

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ
СООБЩЕНИЯ, том 16, выпуск 3, 2019

ISSN (Print) 1815-588X

ISSN (Online) 2658-6851

Учредитель и издатель

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

Адрес учредителя и издателя

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

Адрес редакции

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

В. В. Сапожников, д-р техн. наук, профессор

Научный редактор

А. К. Канаев, д-р техн. наук, доцент

Выпускающий редактор

Э. А. Горелик

Перевод на английский язык

Ю. А. Фаттахова, Д. И. Иванов

Верстка

А. А. Стуканова

Редактор

В. Е. Филиппова

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

Юсупов Рафаэль Мидхатович, д-р техн. наук,
профессор, чл.-корр. РАН, Институт информатики
и автоматизации РАН, Санкт-Петербург, Россия

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

Блашко Людмила Сергеевна, 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

Гуда Александр Николаевич, д-р техн. наук, профессор,
РГУПС, Ростов-на-Дону, Россия

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

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

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

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

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

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

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

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

Фото на обложке из архивов библиотеки

ФГБОУ ВО ПГУПС. 1910 г.

Подписано в печать с оригинал-макета 20.09.2019.

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

Усл. печ. л. 26,25. Установочный тираж 300 экз.

Заказ 930. Цена свободная.

Отпечатано в типографии ПГУПС

190031, СПб., Московский пр., 9.

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2019

SCIENTIFIC PUBLICATION

PROCEEDINGS OF PETERSBURG TRANSPORT UNIVERSITY, volume 16, issue 3, 2019

ISSN (Print) 1815-588X

ISSN (Online) 2658-6851

Founder and publisher

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

Founder and publisher address

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

Editorial address

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

e-mail: izvestia@izvestiapgups.org

Mass media registration certificate number

П И Н Ф С 2 - 7 4 9 9 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, Cand. of Economics, Associate Professor

Deputy chief editor

V. Sapozhnikov, D. Eng., Professor

Science editor

A. Kanayev, D. Eng., Associate Professor

Executive editor

E. Gorelik

English translation

Yu. Fattakhova, D. Ivanov

Layout

A. Stukanova

Editor

V. Philippova

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

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

Rafael Yusupov, D. Eng. Sci., Professor, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

Ekhhard 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

Lyudmila Blazhko, 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

Aleksander Guda, D. Eng. Sci., Professor, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

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

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

Published by Petersburg State Transport University

190031, St. Petersburg., Moskovskiy pr., 9

Open price

© Petersburg State Transport University, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

→ ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Н. С. Нестерова, Вл. А. Анисимов

Формирование множества возможных стратегий этапного изменения облика и мощности объектов мультимодальной транспортной сети 329

Г. И. Никифорова

Взаимодействие железнодорожного и морского транспорта в логистической цепи доставки внешнеторгового грузопотока 339

О. Д. Покровская, Т. С. Титова

Категория «идеальный терминал» как способ комплексной оценки логистического объекта 347

→ СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – ТРАНСПОРТУ

Ж. Я. Абдуллаев

Особенности определения пропускной способности двухпутных участков 361

И. Г. Белозерова

Моделирование планируемой погрузки по различным сценариям 372

А. Т. Бурков, В. Г. Жемчугов

Показатели эксплуатационной надежности системы тягового электроснабжения постоянного тока с продольной питающей линией высокого напряжения 380

А. А. Воробьев, Д. А. Жуков, К. Л. Лукьяненко, В. И. Кулик, А. С. Нилов

Применение композиционных материалов в тормозных системах высокоэнергетичных составов железнодорожного транспорта 391

П. В. Дворкин, Д. Н. Курилкин

Анализ теплового состояния тяговых электродвигателей по данным микропроцессорной системы управления тепловоза 401

И. Г. Киселев, Н. С. Кузнецников, П. А. Ковалева

Применение тепловых аккумуляторов на объектах стационарной теплоэнергетики железнодорожного транспорта 410

Н. С. Комовкина, Л. А. Половинко, А. Ю. Попадюк

Обоснование строительства дополнительных путей на станциях для отстоя на них избытка порожних вагонов или отставленных от движения составов поездов 419

Л. В. Мартыненко, Н. Ю. Соснов

Лазерный профилометр поверхности катания как универсальное средство измерения профиля колесной пары при тревожных показаниях комплекса технических измерений 427

С. Б. Сатторов, А. Г. Котенко, В. Л. Белозеров

Вопросы развития железнодорожной линии Ахангаран–Тукимачи–Сырдарьинская 439

Т. Г. Сергеева

Совершенствование управления парком частных вагонов 449

Х. Т. Туранов, Я. О. Рузметов, А. В. Якушев

О деформируемом состоянии механической системы «груз–вагон–крепление» 455

М. А. Шрайбер

Диагностика теплового состояния якоря тягового электродвигателя постоянного тока 469

А. Я. Якушев, Т. М. Назирхонов, Ж. О. Кувондинов, Д. О. Раджибаев

Влияние системы безопасности высокоскоростного электропоезда «Afrosiyob» на условия эксплуатации 478

→ ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ**А. И. Адылходжаев, И. А. Кадыров, К. С. Умаров, А. А. Назаров**

К вопросу механоактивации цеолитсодержащих пород 489

З. В. Кахаров, Ф. Ф. Эшонов, И. С. Козлов

Определение величин энергетических констант материалов при дроблении твердых тел 499

А. А. Никитченко, Д. В. Шевченко, В. А. Дубинский

Расчет силовых характеристик фрикционного поглощающего аппарата с применением метода конечных элементов 505

С. И. Степанов, И. В. Митрофанова

Повышение энергетической эффективности систем снабжения промышленных предприятий сжатым воздухом 515

В. И. Штыков, А. Б. Пономарёв

Гидравлический расчет бесполостных дрен треугольного поперечного сечения при переходном режиме 523

CONTENTS

→ ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ
N. S. Nesterova, Vl. A. Anisimov

Building up a set of feasible strategies for gradual image and power change of multimodal transportation network facilities 329

G. I. Nikiforova

Interaction of rail and maritime transport in the delivery supply chain of overseas trade cargo traffic 339

O. D. Pokrovskaya, T. S. Titova

Category of "ideal terminal" as a method for integrated assessment of a logistical object 347

→ СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – ТРАНСПОРТУ
Zh. Ya. Abdullaev

Regularity of definition of train-handling capacity at double-track railroad sections 361

I. G. Belozerova

Simulation of the planned loading for various scenarios 372

A. T. Burkov, V. G. Zhemchugov

Operating reliability indices for the direct current traction energy system with longitudinal high-voltage line 380

A. A. Vorobyev, D. A. Zhukov, K. L. Lukyanenko, V. I. Kulik, A. S. Nilov

Application of composite materials in brake systems of high-power railway trains 391

P. V. Dvorkin, D. N. Kurilkin

The analysis of traction motor thermal condition according to the data of the microprocessor-based locomotive control system 401

I. G. Kiselev, N. S. Kuznechenkov, P. A. Kovaleva

The use of heat accumulators at stationary railway heat-power engineering facilities 410

N. S. Komovkina, L. A. Polovinko, A. Yu. Popadyuk

Justification of auxiliary staging tracks construction at stations for empty cars or train sets dismissed from operation 419

L. V. Martynenko, N. Yu. Sosnov

Laser profilometer for rolling surface as a universal measuring instrument for wheel pair profile for alarming indications of a technical measurements system 427

S. B. Sattorov, A. G. Kotenko, V. L. Belozerov

Questions of development of the Ohangaron–Tukimachi–Sirdaryo railway line 439

T. G. Sergeeva

Improvement of private wagons fleet management 449

Kh. T. Turanov, Ya. O. Ruzmetov, A. V. Yakushev

On deformable state of the "cargo–wagon–fastening" mechanical system 455

M. A. Schreiber

Diagnosis of the thermal state of the rotor of a direct-current electric traction motor 469

A. Ya. Yakushev, T. M. Nazirkhonov, Zh. O. Kuvondikov, D. O. Rajibaev

The influence of the safety system of the "Afrosiyob" high-speed electric train on operating conditions 478

→ ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ**A. I. Adylkhodjayev, I. A. Kadyrov, K. S. Umarov, A. A. Nazarov**

On mechanical activation of zeolite-containing rocks 489

Z. V. Kakharov, F. F. Ashonov, I. S. Kozlov

Evaluation of material power constants during shattering of solids 499

A. A. Nikitchenko, D. V. Shevchenko, V. A. Dubinskiy

Calculation of the force characteristics of the friction draft gears using the finite element method 505

S. I. Stepanov, I. V. Mitrofanova

Improving energy efficiency of industrial enterprises' compressed air distribution systems 515

V. I. Shtykov, A. B. Ponomarev

Hydraulic calculation of non-cavity triangular cross-section drains in transient regime 523



УДК 656.078

Формирование множества возможных стратегий этапного изменения облика и мощности объектов мультимодальной транспортной сети

Н. С. Нестерова¹, Вл. А. Анисимов²

¹ Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 680000, Хабаровск, ул. Серышева, 47

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

Для цитирования: *Нестерова Н. С., Анисимов Вл. А.* Формирование множества возможных стратегий этапного изменения облика и мощности объектов мультимодальной транспортной сети // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 3. – С. 329–338. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-329-338

Аннотация

Цель: Предложить методику формирования множества возможных стратегий этапного изменения облика и мощности объектов мультимодальной транспортной сети для методологии проектирования ее развития. Мультимодальная транспортная сеть в данном исследовании рассматривается как совокупность мультимодальных транспортных коридоров, состоящих из мультимодальных транспортных узлов и транспортных звеньев различных видов транспорта и решающих стратегические задачи перевозки грузов и пассажиров. **Методы:** Применены методы системного анализа, математической логики, математического моделирования процессов и систем. **Результаты:** Разработана методика формирования множества возможных стратегий по изменению облика и мощности объектов мультимодальной транспортной сети. Для сокращения размерности задачи использованы: декомпозиция облика мультимодальной транспортной сети; принцип задания начальных условий; технологические отношения, которые определяют последовательность выполнения мероприятий во времени, их обусловленность по отношению друг к другу и совместимость, зависящие от вида и местоположения мероприятий, а также возможных технических состояний других объектов, принадлежащих одному и тому же мультимодальному транспортному коридору. **Практическая значимость:** В рамках методологии проектирования развития мультимодальной транспортной сети предлагаемая методика позволит сформировать исходное множество возможных стратегий изменения облика и мощности объектов сети, необходимое для поиска области эффективных стратегий и принятия оптимального проектного решения.

Ключевые слова: Мультимодальная транспортная сеть, сбалансированная система показателей, стратегия развития, транспортная сеть, транспортный коридор, мультимодальный транспортный коридор, транспортный узел, мультимодальный транспортный узел.

Введение

Развитие транспортной инфраструктуры Единой транспортной системы (ЕТС) должно не только удовлетворять потребности населения и экономики в перевозках, но и предшествовать социально-экономическому развитию страны и регионов. Учитывая высокую стоимость транспортных устройств и сооружений, необходимо концентрировать внимание на развитии тех приоритетных транспортных объектов, которые позволят эффективно решать различные стратегические задачи перевозки грузов и пассажиров на основных транзитных и экспортных маршрутах, включая те, которые поставлены «Транспортной стратегией Российской Федерации на период до 2030 года» [1]. Во всех сценариях развития транспортной системы страны к стратегическим задачам относят реализацию транзитного потенциала России и опережающее развитие транспортной инфраструктуры на направлениях экспортных поставок грузов [1]. С этой целью предлагается выделять из ЕТС мультимодальную транспортную сеть (МТС), как совокупность мультимодальных транспортных коридоров (МТК), состоящих из мультимодальных транспортных узлов (МТУ) и транспортных звеньев (ТЗ) различных видов транспорта [2].

В существующих транспортных исследованиях отечественных и зарубежных ученых и специалистов [3–13] предлагаются модели, методы и методики для решения отдельных задач функционирования и развития МТК. Анализ этих работ, приведенный в [2, 14], показал актуальность проблемы развития транспортной инфраструктуры для мультимодальных перевозок и подтвердил необходимость разработки методологии проектирования комплексного развития МТС, как научно обоснованного инструмента для решения стратегических задач развития транспорта России, поставленных в [1].

Основные положения данной методологии изложены в [2, 14, 15].

В соответствии с логикой процесса проектирования укрупненная функциональная

структура методологии представлена следующими последовательными этапами [2]:

- 1) постановка проблемы проектирования развития МТС;
- 2) разработка вариантов облика МТС;
- 3) формирование множества возможных стратегий этапного изменения облика и мощности объектов МТС;
- 4) формирование области эффективных стратегий этапного изменения облика и мощности МТС;
- 5) работа лица, принимающего решения (ЛПР), с областью эффективных стратегий для принятия решения;
- 6) сопровождение реализации принятой стратегии.

Первый этап рассмотрен в [2, 16, 17], второй – в [18].

В настоящей статье описана методика формирования множества возможных стратегий этапного изменения облика и мощности объектов МТС, позволяющая определить исходное множество стратегий по каждому расчетному случаю [2, 19]. Данное множество используется для поиска области эффективных стратегий и выбора оптимального проектного решения.

Основные положения методики

Основой предлагаемой методики является формализованное описание системного представления облика МТС, ее функционирования и развития с помощью теории систем в виде теоретико-множественной модели [14, 20]. Разработанные теоретико-множественные модели дают возможность объединить результаты решения локальных задач развития объектов МТС в единое целое на базе использования сбалансированной системы показателей (ССП) [2, 21–23].

Обобщенно модель облика МТС с учетом его четырехуровневой декомпозиции представлена на рис. 1, модель функционирования и развития МТС – на рис. 2. Детальное описание теоретико-множественных моделей приведено в [14, 20].

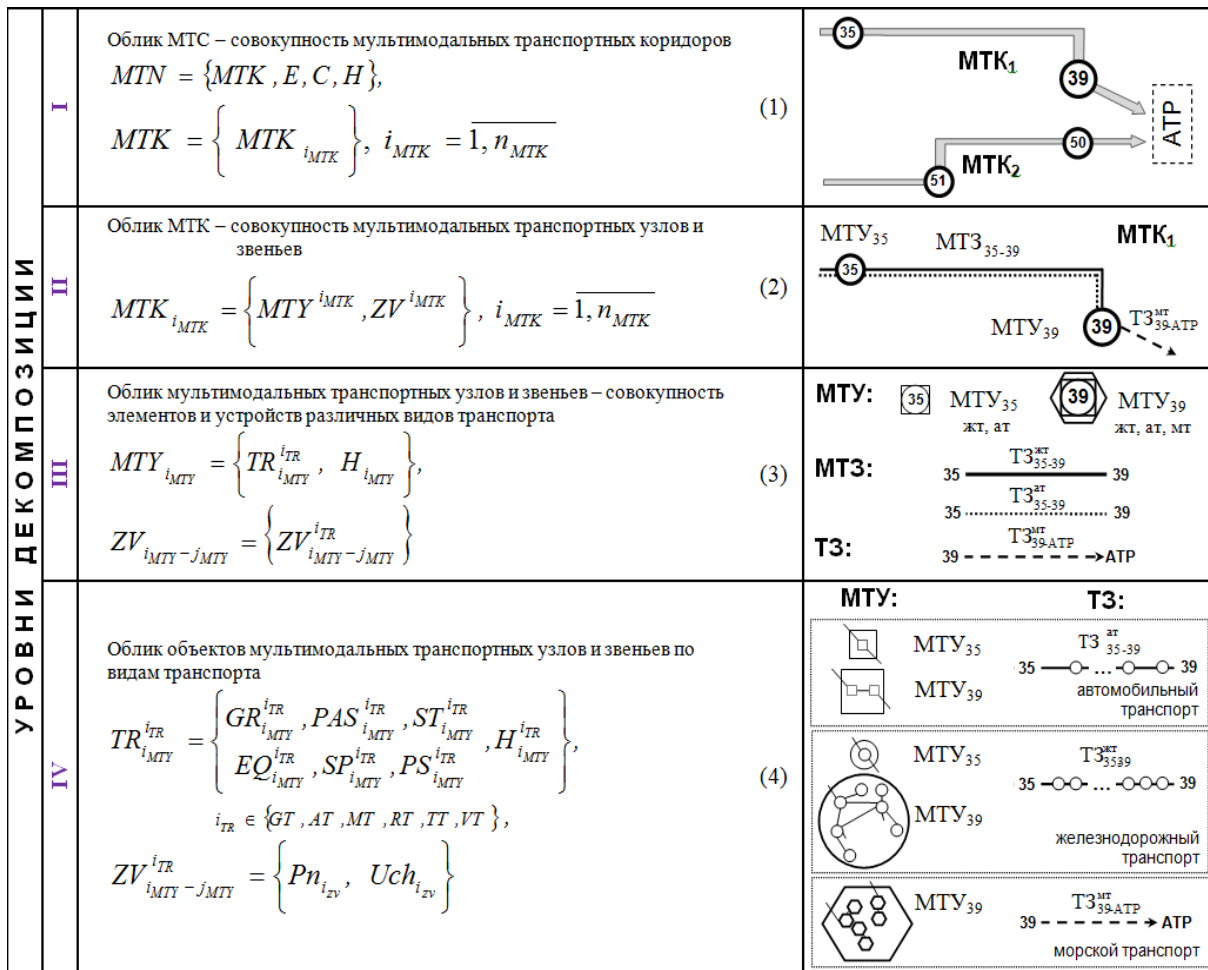


Рис. 1. Теоретико-множественная модель облика МТС

Исходное множество возможных стратегий этапного изменения облика и мощности объектов МТС формируется в рамках расчетного случая, математическая модель которого приведена в [2, 19]. Оно используется в методологии для определения возможных вариантов потребных объемов перевозок по объектам МТС $\Gamma_{\Pi(i_{rs})}^{g^o}(t)$ на расчетный период в соответствии с вариантами расчетных схем облика МТС [18] в зависимости от различных сценариев социально-экономического развития исследуемого региона и вариантов потребных объемов перевозок по мультимодальным транспортным коридорам [2].

Последовательно рассмотрим основные пункты методики [2].

1. По расчетной схеме облика МТС определяют МТУ, ТЗ, входящие в них объекты и

отношения между ними, согласно теоретико-множественной модели (1)–(4) (см. рис. 1).

2. Для каждого объекта МТС в соответствии с моделью

$$f : (P^{g^o}, SP^{g^o}, T^{g^o}) \rightarrow C$$

формируют подмножество технических параметров P^{g^o} объекта МТС, способов SP^{g^o} и технологий T^{g^o} его работы, которые влияют на показатели C , определяющие цели функционирования и развития МТС (см. (5) – (13)). В [23] подмножество $P^{g^o}, SP^{g^o}, T^{g^o}$ подробно рассмотрено для объектов железнодорожного транспорта.

3. С помощью систем мониторинга технического состояния объектов МТС определяют

<p>Облик мультимодальной транспортной сети</p>	$MTN = \{MTK, E, C, H\}, MTK = \{MTK_{i_{MTK}}\}, i_{MTK} = \overline{1, n_{MTK}},$ $E = \{E_{tech}, E_{event}, E_m, E_{fail}, E_{delay}, H_E\},$ $C = \{C_{tec}, C_{ec}, C_{rel}\},$ $H = \{H_{i_H}\}, i_H = \overline{1, n_{i_H}}$	<p>(5)</p>
<p>Параметры, характеризующие техническое состояние элементов МТС</p>	$P = \{P_{MTY}, P_{zv}\},$ $P_{MTY} = \{P_{gr}, P_{pas}, P_{st}, P_{eq}, P_{sp}, P_{ps}\}, P_{zv} = \{P_{Pn}, P_{Uch}\}$	<p>(6)</p>
<p>Техническое состояние транспортного звена</p>	$S_{i_{zv}} = \{\{P_{Pn_{i_{zv}}}\}, \{P_{Uch_{i_{zv}}}\}, \{SP_{i_{zv}}\}, \{T_{i_{zv}}\}\}$	<p>(7)</p>
<p>Техническое состояние мультимодального транспортного узла</p>	$S_{i_{MTY}} = \left\{ \left\{ \left\{ P_{gr_{i_{MTY}}^{iTR}} \right\}, \left\{ P_{pas_{i_{MTY}}^{iTR}} \right\}, \left\{ P_{st_{i_{MTY}}^{iTR}} \right\} \right\}, \left\{ SP_{i_{MTY}} \right\}, \left\{ T_{i_{MTY}} \right\} \right\}$	<p>(8)</p>
<p>Мероприятие, направленное на изменение облика и мощности объекта МТС</p>	$Em_{im}^{g^o} = \{Inf_{im}, Par_{im}, K_{im}, H_{im}\}$	<p>(9)</p>
	$\{Em_{im}^{g^o}\} = \{\{Em_{im}^{i_{MTY}}\}, \{Em_{im}^{i_{zv}}\}\},$ $\{Em_{im}^{i_{MTY}}\} = \left\{ \left\{ Em_{im_{gr}}^{gr_{i_{MTY}}^{iTR}} \right\}, \left\{ Em_{im_{pas}}^{pas_{i_{MTY}}^{iTR}} \right\}, \left\{ Em_{im_{st}}^{st_{i_{MTY}}^{iTR}} \right\} \right\},$ $\left\{ \left\{ Em_{im_{eq}}^{eq_{i_{MTY}}^{iTR}} \right\}, \left\{ Em_{im_{sp}}^{sp_{i_{MTY}}^{iTR}} \right\}, \left\{ Em_{im_{ps}}^{ps_{i_{MTY}}^{iTR}} \right\} \right\}$ $\{Em_{im}^{i_{zv}}\} = \{\{Em_{im_{pn}}^{Pn_{i_{zv}}}\}, \{Em_{im_{uch}}^{Uch_{i_{zv}}}\}\}, g^o \in \{TR_{i_{MTY}}^{iTR}, Pn_{i_{zv}}, Uch_{i_{zv}}\}$	<p>(10)</p>
	$E_m = \{E_{rep}, E_{ota}, E_{dev}, H_m\} E_{dev} = \{E_{new}, E_{rec}, E_{ps}, E_{mod}\}$	<p>(11)</p>
<p>Стратегия этапного изменения облика и мощности объекта МТС</p>	$Str^{g^o}(t) = \left\{ str_{i_{str}}^{g^o}(t) \mid i_{str} \in \overline{1, n_{i_{str}}^{g^o}} \wedge g^o \in \{TR_{i_{MTY}}^{iTR}, Pn_{i_{zv}}, Uch_{i_{zv}}\} \right\},$ $\Delta Eff(t, f : str_{i_{str}}^{g^o}(t) \rightarrow Em_{i_{str}}^{g^o}(t)) \rightarrow \Delta C, t = \overline{1, T_p}$	<p>(12)</p>
	$K(t, Em_{i_{str}}^{g^o}(t)) \leq K_{\Pi}(t)$	<p>(13)</p>

Рис. 2. Теоретико-множественная модель функционирования и развития МТС

фактические значения параметров P^{g^o} , по которым устанавливают существующее техническое состояние объектов и рассчитывают наличную мощность объектов.

4. Выявляют проблемные объекты МТС посредством сопоставления потребной мощности $\Gamma_{n(i_{rs})}^{g^o}(t)$ с их наличной мощностью $\Gamma_n^{g^o}(t)$ по годам расчетного периода.

5. По каждому проблемному объекту МТС предлагают возможные варианты изменения его технического состояния, в соответствии с которыми назначают множество возможных мероприятий изменения его облика и мощности $\{Em_{im}^{g^o}\}$ (см. (9), (10)).

6. Между мероприятиями в зависимости от их вида и местоположения устанавливают отношения H_m (11), учитывающие их совместимость, обусловленность и последовательность реализации на данном объекте и объектах МТС, принадлежащих одному МТК.

Во фреймовой модели мероприятия, разработанной в работе [24], выделены три вида отношений H_m :

– H_b – структурное отношение, характеризующее совместимость либо несовместимость

мероприятий в рамках одного и того же варианта, обусловленность одних мероприятий другими (односторонняя связь) либо взаимную обусловленность (двунаправленная связь) и др.;

– H_T – порядковое отношение, регламентирующее допустимый порядок выполнения мероприятий относительно друг друга;

– H_c – отношение, характеризующее тип совместного влияния мероприятий на показатели эффективности проекта.

7. На основе множества возможных мероприятий $\{Em_{im}^{g^o}\}$ с учетом отношений H_m формируют множество возможных технических состояний $S^{g^o} = \left\{ s_{i_s}^{g^o} \mid i_s \in \overline{1, n_s^{g^o}} \right\}$ по каждому проблемному объекту МТС.

8. Для каждого технического состояния $s_{i_s}^{g^o}$ рассчитывают возможную мощность объекта МТС $\Gamma_{B(i_s)}^{g^o}(t)$ по годам расчетного периода.

9. В соответствии с моделями (12), (13) по каждому проблемному объекту МТС, сопоставляя возможную мощность $\Gamma_{B(i_s)}^{g^o}(t)$ с потребной $\Gamma_{n(i_{rs})}^{g^o}(t)$, с учетом отношений H_m

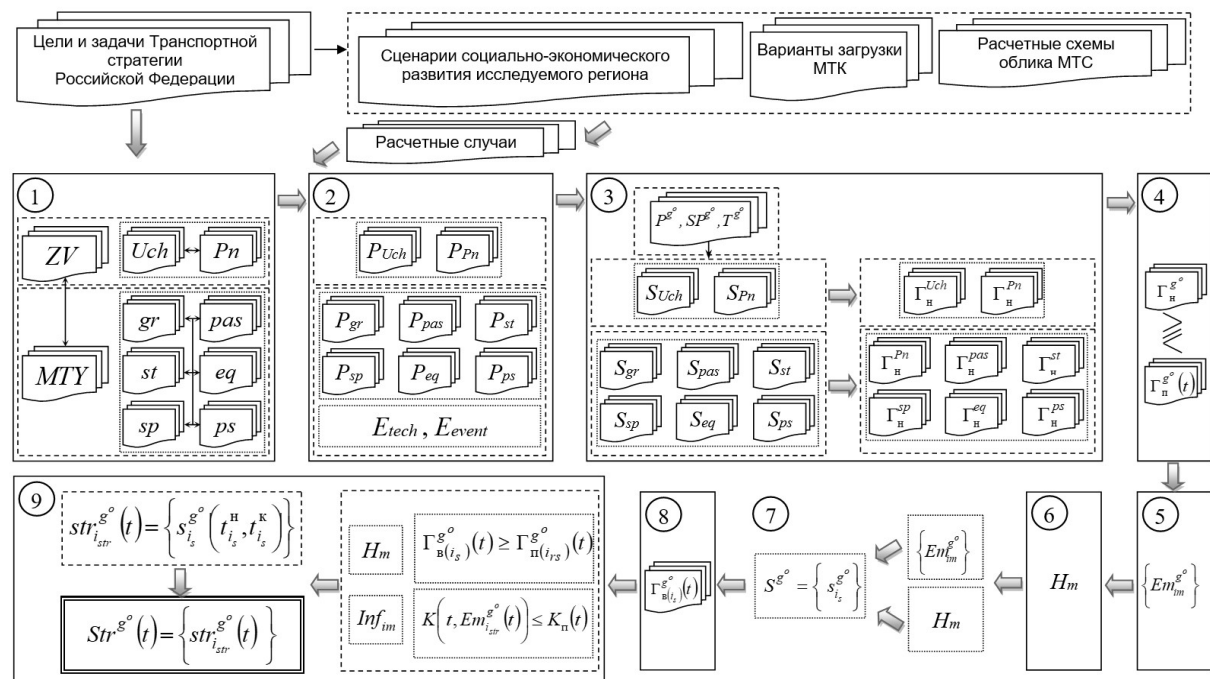


Рис. 3. Схема методики формирования множества возможных стратегий этапного изменения облика и мощности объектов МТС

формируют исходное множество возможных стратегий изменения облика и мощности объектов МТС, которые представляют собой траектории изменения технического состояния объекта во времени:

9.1. Определяют возможные траектории изменения технического состояния объекта во времени по годам расчетного периода, сравнивая его возможные мощности по каждому $s_i^{g^o}$ с потребными объемами перевозок, при этом должно выполняться условие $\Gamma_{B(i_k)}^{g^o}(t) \geq \Gamma_{П(i_{rs})}^{g^o}(t)$.

9.2. По каждой траектории в соответствии с последовательностью реализации мероприятий устанавливают объем требуемых инвестиций $K(t, Em_{i_{str}}^{g^o}(t))$, при этом из дальнейшего рассмотрения исключаются стратегии, которые не удовлетворяют условию (13), т. е. превышают заданный предел инвестиций.

На рис. 3 предлагаемая методика представлена в виде схемы.

Заключение

Исходное множество возможных стратегий этапного изменения облика и мощности объектов МТС, четырехуровневая декомпозиция облика МТС и отношения между мероприятиями используются для поиска области эффективных стратегий развития МТС. При этом отношения между мероприятиями позволяют уменьшить размерность задачи путем исключения состояний, которые не могут сочетаться с другими состояниями по примыкающим объектам МТС.

Библиографический список

1. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года. – Утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 22 ноября 2008 г. № 1734-р (с утв. изменениями распоряжением Правительства Российской Федерации от 11 июня 2014 г. № 1032-р).

2. Нестерова Н. С. Методология проектирования мультимодальной транспортной сети : дис. ... д-ра техн. наук, специальность : 05.22.01 / Н. С. Нестерова. – Хабаровск : ДВГУПС, 2017. – 387 с.

3. Свинцов Е. С. Регионально-транспортные исследования в современных условиях : монография / Е. С. Свинцов. – М. : Маршрут, 2005. – 301 с.

4. Сазонов С. Л. Транспортная составляющая проектов сопряжения Европейского экономического союза и «экономического пояса шелкового пути» / С. Л. Сазонов, Е. С. Кудрявцев, У. Цзы // Проблемы Дальнего Востока. – 2015. – № 2. – С. 47–58.

5. Королева Е. А. Организационно-экономические основы функционирования транспортных коридоров : дис. ... д-ра экон. наук, специальность : 08.00.05 / Е. А. Королева. – СПб. : ПГУПС, 2000. – 371 с.

6. Морозов В. Н. Методология организации функционирования международных транспортных коридоров на основе кластерного подхода с применением мультимодальных логистических центров : дис. ... д-ра техн. наук, специальность : 05.22.01 / В. Н. Морозов. – М. : Моск. гос. ун-т путей сообщения (МИИТ), 2010. – 434 с.

7. Drożdźziel P. Prospects of international freight transport in the East-West direction / P. Drożdźziel, B. Buková, E. Brumerčíková // Transport Problems. – 2015. – Vol. 10, N 4. – P. 5–13.

8. Гончаренко Е. С. Российские участки международных транспортных коридоров как объект экономического исследования : дис. ... канд. экон. наук, специальность : 08.00.05 / Е. С. Гончаренко. – М. : Гос. ун-т управления, 2015. – 189 с.

9. Чумляков К. С. Национальный транзитный потенциал в системе международных транспортных коридоров / К. С. Чумляков, Д. В. Чумлякова // Бюл. транспортной информации. – 2015. – № 11 (245). – С. 8–13.

10. Мачерет Д. А. Экономическая перспектива евроазиатских транспортных коридоров / Д. А. Мачерет // Соискатель – приложение к журналу «Мир транспорта». – 2015. – № 1 (9). – С. 58–61.

11. Ковалев С. Г. Трансконтинентальный потенциал и неоиндустриальное развитие России / С. Г. Ковалев // Соискатель – приложение к журналу «Мир транспорта». – 2015. – № 1 (9). – С. 62–67.

12. Шаповал Д. В. Развитие международных транспортных коридоров / Д. В. Шаповал // *Техника и технологии строительства*. – 2016. – № 1 (5). – С. 8.
13. Быков Ю. А. Прогнозирование развития транспортных коридоров России в сообщении Европа–Азия / Ю. А. Быков, А. Б. Васильев, В. А. Фадеева // *Транспорт Урала*. – 2015. – № 1 (44). – С. 53–56.
14. Nesterova N. S. Set-theoretic model of strategies of development for objects of multimodal transport network / N. S. Nesterova, S. M. Goncharuk, V. A. Anisimov, A. V. Anisimov, V. S. Shvartcfel // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 165. – P. 1547–1555.
15. Нестерова Н. С. Проектирование мультимодальной транспортной сети / Н. С. Нестерова, Вл. А. Анисимов, С. М. Гончарук // *Бюл. результатов науч. исследований*. – СПб. : ПГУПС, 2017. – Вып. 4. – С. 41–51.
16. Нестерова Н. С. Концепция методологии проектирования развития мультимодальной транспортной сети / Н. С. Нестерова // *Проектирование развития региональной сети железных дорог : сб. науч. трудов / под ред. В. С. Шварцфельда*. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2016. – Вып. 4. – С. 55–61.
17. Нестерова Н. С. Исследование основных элементов мультимодальной транспортной сети / Н. С. Нестерова // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. – 2016. – № 2 (50). – С. 173–179.
18. Нестерова Н. С. Формирование облика мультимодальной транспортной сети / Н. С. Нестерова // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. – 2016. – № 3 (51). – С. 146–153.
19. Nesterova N. S. A mathematical model of the estimated cases for designing a multimodal transport network / N. S. Nesterova, S. M. Goncharuk, V. A. Anisimov, A. V. Anisimov // *Intern. Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017, Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2018. – Vol. 692. – P. 177–183.
20. Нестерова Н. С. Теоретико-множественная модель мультимодальной транспортной сети / Н. С. Нестерова, Вл. А. Анисимов // *Транспорт Урала*. – 2016. – № 2 (49). – С. 26–29.
21. Нестерова Н. С. Сбалансированная система показателей для оценки стратегий развития мультимодальной транспортной сети / Н. С. Нестерова, Вл. А. Анисимов // *Изв. Петерб. ун-та путей сообщения*. – СПб. : ПГУПС, 2016. – Т. 13, вып. 2 (47). – С. 197–205.
22. Нечипорук М. В. К вопросу использования сбалансированной системы показателей при моделировании взаимодействия железнодорожного и морского транспорта в мультимодальном транспортном узле / М. В. Нечипорук, Вл. А. Анисимов // *Транспорт Урала*. – 2014. – № 3 (42). – С. 13–17.
23. Анисимов В. А. Теория и практика проектирования развития региональной сети железных дорог с учетом изменения облика и мощности станций и узлов : дис. ... д-ра техн. наук, специальность : 05.22.03 / В. А. Анисимов. – М. : Моск. гос. ун-т путей сообщения (МИИТ), 2005. – 380 с.
24. Анисимов В. А. Основы теории и технологии формирования проектов переустройства железных дорог : препринт № 41 / В. А. Анисимов. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2002. – 60 с.

Дата поступления: 27.06.2019

Решение о публикации: 08.07.2019

Контактная информация:

НЕСТЕРОВА Наталья Станиславовна – д-р техн. наук, доцент; mer-maid2@yandex.ru

АНИСИМОВ Владимир Александрович – д-р техн. наук, профессор; anisvl@mail.ru

Building up a set of feasible strategies for gradual image and power change of multimodal transportation network facilities

N. S. Nesterova¹, V. A. Anisimov²

¹ Far Eastern State Transport University, 47, Seryshev ul., Khabarovsk, 680000, Russian Federation

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

For citation: Nesterova N. S., Anisimov V. A. Building up a set of feasible strategies for gradual image and power change of multimodal transportation network facilities. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 3, pp. 329–338. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-329-338 (In Russian)

Summary

Objective: To introduce a technique for building up a set of feasible strategies for gradual image and power change of multimodal transportation network (MTN) facilities for design techniques of MTN improvement. In the given study MTN is considered as an aggregate of multimodal transport corridors (MTC), consisting of multimodal transport nodal points (MTNP) and transport links (TL) of different types of transport solving strategic tasks of cargo and passenger transport. **Methods:** The methods of systems analysis, mathematical logic, as well as mathematical simulation of processes and systems were applied. **Results:** A technique for building up a set of feasible strategies for gradual design and power change of MTN facilities was developed. The following actions were used in order to reduce the dimensions of tasks: decomposition of MTN image; the concept of initialization; technological relations which determine the sequence of implementation of actions, as well as conditionality and compatibility, depending on the type and location of activities including any technical states of other objects, being a part of one and the same MTC. **Practical importance:** Within the framework of the design techniques of MTN improvement the introduced technique will make it possible to build up an assumed set of feasible strategies for image and power change of MTN facilities, required for the effective strategy domain detection and an effective project decision-making.

Keywords: Multimodal transport network, balanced score card, development strategy, transport network, transport corridor, multimodal transport network, transport nodal point, multimodal transport nodal point.

References

1. *Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda*. Utv. rasporyazheniyem Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii ot 22 noyabrya 2008 g. no. 1734-p (s utv. izmeneniyamy rasporyazheniyem Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii ot 11 iyunya 2014 g. no. 1032-r) [*The Russian Federation transport strategy through to 2030*. Appr. by the regulation of the Russian Federation Government dated November 22 2008 no.1734-r (with amendments appr. by the regulation of the Russian Federation Government dated June 11 2014 no. 1032-r)]. (In Russian)

2. Nesterova N. S. *Metodologiya proektirovaniya multimodalnoy transportnoy sety* [*Design methodology for multimodal transport network*]. Dis. ...D. Sci. Eng., speciality: 05.22.01. Khabarovsk, DGUPS [Far Eastern State Transport University] Publ., 2017, 387 p. (In Russian)

3. Svintsov E. S. *Regionalno-transportniye issledovaniya v sovremennykh* [*Regional transport research in the present context*]. Monograph. Moscow, Marshrut Publ., 2005, 301 p. (In Russian)

4. Sazonov S. L., Kudryavtsev E. S. & Tszy U. *Transportnaya sostavlyayushchaya proektov sopryazheniya Evropeyskogo ekonomicheskogo soyuza i*

“ekonomicheskogo poyasa shelkovogo puty” [Transport constituent of the projects for junction of the European Economic Union and the “Silk Road Economic Belt”]. *Problems of the Far East*, 2015, no. 2, pp. 47–58. (In Russian)

5. Koroleva E.A. *Organizatsionno-ekonomicheskiye osnovy funktsionirovaniya transportnykh koridorov* [Business foundation for operation of transport corridors]. Dis. ...D. Sci. Econ., specialty: 08.00.05. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2000, 371 p. (In Russian)

6. Morozov V.N. *Metodologiya organizatsii funktsionirovaniya mezhdunarodnykh transportnykh koridorov na osnove klasterного podkhoda s primeneniyem multimodalnykh logisticheskikh tse ntrov* [Methodology of organizing international transport corridors based on cluster approach with application of multimodal logistic centers]. Dis. ...D. Sci. Eng., specialty: 05.22.01. Moscow, MIIT [Moscow State Transport University] Publ., 2010, 434 p. (In Russian)

7. Drożdziel P., Buková B., & Brumerčíková E. Prospects of international freight transport in the East-West direction. *Transport Problems*, 2015, vol. 10, no. 4, pp. 5–13.

8. Goncharenko E. S. *Rossiyskiye uchastky mezhdunarodnykh transportnykh koridorov kak object ekonomicheskogo issledovaniya* [Russian sections of international transport corridors as an object of economic research]. Dis. Cand. Sci. Econ., speciality: 08.00.05. Moscow, Gos. University of Management Publ., 2015, 189 p. (In Russian)

9. Chumlyakov K. S. & Chumlyakova D. V. *Natsionalniy tranzitniy potentsial v sisteme mezhdunarodnykh transportnykh koridorov* [The national transit potential in the system of international transport corridors]. *Byulleten transportnoy informatsii* [Transport information bulletin], 2015, no. 11 (245), pp. 8–13. (In Russian)

10. Macheret D. A. *Ekonoicheskaya perspektiva evroaziatskykh transportnykh koridorov* [Economic perspective of Eurasian transport corridors]. *Soiskatel – prilozheniye k zhurnalu mir transporta* [Postgraduate – supplement to the World of Transport], 2015, no. 1 (9), pp. 58–61. (In Russian)

11. Kovalev S.G. *Transkontinentalniy potentsial i neoindustrialnoye razvitiye Rossii* [Transcontinental potential and neo-industrial development of Russia].

Soiskatel – prilozheniye k zhurnalu mir transporta [Postgraduate – supplement to the World of Transport], 2015, no. 1 (9), pp. 62–67. (In Russian)

12. Shapoval D.V. *Razvitiye mezhdunarodnykh transportnykh koridorov* [The development of international transport corridors]. *Tekhnika i tekhnologii stroitelstva* [Building processes and technology], 2016, no. 1 (5), p. 8. (In Russian)

13. Bykov Y.A., Vasiliev A. B. & Fadeeva V.A. *Prognozirovaniye razvitiya transportnykh koridorov Rossii v soobshchenii Evropa–Aziya* [Forecasting the development of transport corridors in Europe–Asia transport communication]. *Transport Urala* [The Ural Transport], 2015, no. 1 (44), pp. 53–56. (In Russian)

14. Nesterova N. S., Goncharuk S. M., Anisimov V.A. & Anisimov A. V., Shvartcfe l V. S. Set-theoretic model of strategies of development for objects of multimodal transport network. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 165, pp. 1547–1555.

15. Nesterova N. S., Anisimov V.I. A. & Goncharuk S.M. *Proektirovaniye multimodalnoy transportnoy sety* [Multimodal transport network design]. *Byulleten rezultatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of research results]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2017, vol. 14, iss. 4, pp. 41–51. (In Russian)

16. Nesterova N. S. *Kontseptsiya metodologii proektirovaniya razvitiya multimodalnoy transportnoy sety* [The concept of the development design methodology of multimodal transport network]. *Proektirovaniye razvitiya regionalnoy sety zheleznykh dorog* [Development design of the regional railway network]. Coll. papers. Ed. by V.S. Schwarzfeld. Khabarovsk, DGUPS [Far Eastern State Transport University] Publ., 2016, iss. 4, pp. 55–61. (In Russian)

17. Nesterova N. S. *Issledovaniye osnovnykh elementov multimodalnoy transportnoy sety* [The study of key elements of the multimodal transport network]. *Sovremenniy tekhnologii. Sistemniy analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. Systems analysis. Simulation], 2016, no. 2 (50), pp. 173–179. (In Russian)

18. Nesterova N. S. *Formirovaniye oblika multimodalnoy transportnoy sety* [Conceptual design of the multimodal transport network]. *Sovremenniy tekhnologii. Sistemniy analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. Systems analysis. Simulation], 2016, no. 3 (51), pp. 146–153. (In Russian)

19. Nesterova N. S., Goncharuk S. M. & Anisimov V. A., Anisimov A. V. A mathematical model of the estimated cases for designing a multimodal transport network. *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport "EMMFT 2017", Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2018, vol. 692, pp. 177–183.
20. Nesterova N. S. & Anisimov V. A. Teoretiko-mnozhestvennaya model multimodalnoy transportnoy sety [A set-theoretical model of the multimodal transport network]. *Transport Urala [Ural Transport]*, 2016, no. 2 (49), pp. 26–29. (In Russian)
21. Nesterova N. S. & Anisimov V. A. Sbalansirovannaya sistema pokazateley dlya otsenki strategiy razvitiya multimodalnoy transportnoy sety [Balanced scorecard system for the assessment of development strategies of the multimodal transport network]. *Izvestiya PGUPS [Proceedings of Petersburg State Transport University]*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2016, vol. 13, iss. 2 (47), pp. 197–205. (In Russian)
22. Nechiporuk M. V. & Anisimov V. A. K voprosu ispolzovaniya sbalansirovannoy sistemy pokazateley pry modelirovaniy vzaimodeystviya zheleznodorozhnogo i morskogo transporta v multimodalnom transportnom uzle [On the use of a balanced system of indices when simulating the interaction of railroad and marine transport in a multimodal transportation hub]. *Transport Urala [Ural Transport]*, 2014, no. 3 (42), pp. 13–17. (In Russian)
23. Anisimov V. A. *Teoriya i praktika proektirovaniya razvitiya regionalnoy sety zheleznikh dorog s uchedom izmeneniya oblika i moshchnosti stantsiy i uzlov [Development design of the regional railway network taking into account image and power change of stations and junctions: principles and practices]*. Dis. ...D. Sci. Eng., specialty: 05.22.03. Moscow, MIIT [Moscow State Transport University] Publ., 2005, 380 p. (In Russian)
24. Anisimov V. A. *Osnovy teorii i tekhnologii formirovaniya proektov pereustroistva zheleznikh dorog [Fundamentals and technologies of creating projects for modification of railroads]*. Preprint no. 41. Khabarovsk, DGUPS [Far Eastern State Transport University] Publ., 2002, 60 p. (In Russian)

Received: June 27, 2019

Accepted: July 08, 2019

Author's information:

Natalya S. NESTEROVA – D. Sci. in Engineering, Associate Professor; mer-maid2@yandex.ru

Vladimir A. ANISIMOV – D. Sci. in Engineering, Professor; anisvl@mail.ru

УДК 625.033.34

Взаимодействие железнодорожного и морского транспорта в логистической цепи доставки внешнеторгового грузопотока

Г. И. Никифорова

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

Для цитирования: Никифорова Г. И. Взаимодействие железнодорожного и морского транспорта в логистической цепи доставки внешнеторгового грузопотока // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 3. – С. 339–346.

DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-339-346

Аннотация

Цель: Совершенствовать параметры взаимодействия железнодорожного и морского транспорта в современных условиях в логистической цепи доставки внешнеторговых грузов. Среди них составление целевой функции затрат логистической цепи; изучение параметров функционирования операторской компании; исследование звена логистической цепи – железнодорожная станция/морской порт; определение параметра звена логистической цепи – количество вагонов в подаче с путей припортовой железнодорожной станции на пути необщего пользования терминала морского порта; расчет оптимального количества вагонов в подаче с технологической и экономической сторон.

Методы: Составление целевой функции затрат, включающей этапы продвижения грузопотока по железнодорожной сети, на стыке взаимодействия железнодорожного и морского транспорта, перемещения морским транспортом. Используются метод Парето для классификации вагонного парка, а также теория управления запасами, где вагоны представляют собой запас. **Результаты:** Указана необходимость совершенствования параметров логистической цепи. Выведена расчетная формула целевой функции затрат. Исследована составляющая целевой функции затрат в части взаимодействия припортовой железнодорожной станции и терминала морского порта относительно количества вагонов в подаче. **Практическая значимость:** Представлена методика определения оптимального количества вагонов в подаче с путей железнодорожной припортовой станции на пути терминала морского порта, исходя из запаса вагонов на станции, интервала времени между подачами и стоимостью подачи. Рассматривается парк вагонов в управлении операторской компании с выделением синтетического критерия классификации для дифференциации наиболее значимых групп.

Ключевые слова: Взаимодействие железнодорожного и морского транспорта, звено логистической цепи, внешнеторговый грузопоток, оптимальное число вагонов в подаче, теория управления запасами, целевая функция затрат, метод Парето, ABC-классификация.

Существует ряд исследований, посвященных теме взаимодействия смежных видов транспорта, в которых изучалась важность терминалов и складских комплексов в процессе продвижения грузопотока [1, 2]. Однако при передаче грузопотока с одного вида транспорта на другой действует множество факторов:

организационных, технологических, технических, информационных и т. д., причем функционирование железнодорожного транспорта имеет свои особенности, которые необходимо учитывать при исследовании логистических цепей с участием ОАО «РЖД». Эффективное функционирование компаний-операторов,

как владельцев железнодорожного подвижного состава, также играет весомую роль при решении задач транспортного обслуживания.

Основным ресурсом развития железнодорожной отрасли является включение железнодорожных перевозок в логистические цепочки доставки грузов [3], при этом эффективное взаимодействие со смежными видами транспорта, очевидно, приобретает высокое значение. Повышение эффективности взаимодействия морского и железнодорожного транспорта всегда представляло интерес с практической и научной точек зрения. Задача поиска оптимального управления потоками вагонов, контейнеров в мультимодальных перевозках внешнеторговых грузов может быть представлена в виде целевой функции суммарных затрат всех элементов логистической цепи, которая должна стремиться к минимуму:

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

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

Задачи минимизации затрат на этапе корреспонденции грузопотоков с терминала станции отправления до терминала морского порта зависят в большей степени от работы и организации взаимодействия владельца инфраструктуры, перевозчика и оператора подвижного состава. ОАО «РЖД» в настоящее время регулирует деятельность участников

перевозочного процесса путем соблюдения и обеспечения технологии перевозочного процесса, описываемой в Едином сетевом технологическом процессе железнодорожных грузовых перевозок (ЕСТП) [4]. Назначение ЕСТП заключается в следующем: нормативно-технологическое обеспечение управления процессом железнодорожных грузовых перевозок; организация системного взаимодействия участников перевозочного процесса; эффективное использование ресурсов по всем элементам управления перевозками. Участниками ЕСТП являются: грузоотправители; грузополучатели; владельцы железнодорожных путей необщего пользования; операторы железнодорожного подвижного состава; ОАО «РЖД», как владелец инфраструктуры и перевозчик грузов [4].

К основным функциям операторов железнодорожного подвижного состава, согласно ЕСТП, относятся следующие:

- согласование грузоотправителю условий предоставления вагонов на планируемый месяц (по сформированной заявке на перевозку) и на более длительный период (по долгосрочному договору на организацию перевозки);
- предоставление грузоотправителю порожних вагонов по предварительно согласованной с ним заявке на перевозки;
- предоставление перевозчику грузовых вагонов на основе договора;
- определение станций назначения порожних вагонов в соответствии с заявками грузоотправителей;
- планирование порожних вагонопотоков по объемам и корреспонденциям на календарный месяц;
- согласование с владельцем инфраструктуры возможности временного отстоя порожних грузовых вагонов, не связанных с договором перевозки грузов, порядка, места, сроков и условий их отстоя на железнодорожных путях общего пользования;
- подача в ОАО «РЖД» уведомлений на перевозки порожних вагонов в рамках системы месячного планирования «шахматок» порожних вагонопотоков в установленные сроки до начала планируемого месяца;

– согласование заявок грузоотправителей формы ГУ-12 на перевозку груза в вагонах оператора железнодорожного подвижного состава, включая согласование изменений в заявках данной формы.

В современных условиях эффективное управление парком вагонов – главная задача операторской компании. Анализ рынка операторских компаний позволяет выделить порядка 10–20 крупнейших игроков, которые и будут определять ситуацию с железнодорожным вагонным парком. Индекс Герфиндаля по итогам последних лет составляет $G = 466$, что говорит о монополистической конкуренции. Исследование работы крупнейших операторских компаний во взаимодействии с ОАО «РЖД» позволит минимизировать затраты на первом этапе доставки грузопотоков в рассматриваемой логистической цепи.

Парк вагонов l -й операторской компании можно представить как запас и изучать на основании теории управления запасами. Таким образом, к парку вагонов могут быть применены некоторые методы, в том числе метод Парето [5]. Классификация вагонного парка по ряду критериев может быть удобным инструментом для руководства компании-оператора при управлении предприятием. Выбор критерия должен быть продуман руководством компании с точки зрения минимизации затрат, улучшения эксплуатационных показателей. Так, показатели качества или ключевые показатели эффективности могут быть представлены средним оборотом вагона, маршрутной скоростью перевозок, средней дальностью доставки груза и т. д.

Например, для l -го оператора железнодорожного подвижного состава имеют значение следующие показатели: прибыль от управления вагонами Π , продолжительность оборота вагона τ , парк вагонов N . Каждому из них на основании опыта работы операторской компании присваиваются весовые коэффициенты.

Удобство метода Парето заключается в возможности расчета синтетического критерия

$$K_i = \sum_{i=1}^m N_i k_N, \tau_i k_\tau, \Pi_i k_\Pi,$$

где k_N – весовой коэффициент критерия «парк вагонов»; k_τ – весовой коэффициент критерия «оборот вагона»; k_Π – весовой коэффициент критерия «прибыль от управления вагонами»; m – количество видов подвижного состава.

Далее необходимо рассчитать удельный вес синтетического критерия:

$$Y_i = \frac{K_i}{\sum_{i=1}^m K_i}.$$

Затем следует подсчитать нарастающий итог, который определяется по формуле

$$H_i = \sum_{i=1}^m (H_{i-1}, Y_i).$$

И, наконец, производится выделение групп А, В и С по полученным данным. Для этого используется закон Парето, который утверждает, что 80 % значений качественного критерия определяется 20 % количества совокупности выбранных объектов [5].

Затраты на обслуживание потока вагонов или контейнеров в системе «припортовая станция/морской порт» включают в себя следующие затраты:

- на простой транспортных средств – непроизводительный, в ожидании погрузки/разгрузки;
- на накопление груза на транспортную партию;
- при передаче партии груза с путей железнодорожной станции на пути необщего пользования портового терминала;
- на выполнение погрузо-разгрузочных работ;
- на информационный и документооборот и т. д.

Рассмотрим подробнее затраты при передаче партии груза с путей железнодорожной станции на пути портового терминала в звене логистической системы «припортовая железнодорожная станция/морской порт». Решающее значение приобретает роль терминала как

буфера, необходимого для переработки грузопотока и изменения его параметров. Также важно наряду с потребной емкостью терминала определить оптимальный размер подачи вагонов на пути порта [6, 7].

Исследование оптимального количества вагонов в подаче может проводиться на основании теории управления запасами, которая применима и к работе припортовой железнодорожной станции. Подача вагонов с припортовой станции на пути портового терминала осуществляется группами. С точки зрения минимизации целевой функции затрат целесообразно выявить оптимальный размер вагонов в подаче с использованием теории управления запасами [6, 8].

В общем случае стоимость подачи вагонов на пути портового терминала не зависит от числа вагонов в группе, представим эту постоянную часть затрат как c_l . На железнодорожных припортовых станциях часто возникает ситуация непроизводительного простоя вагонов в ожидании подачи, представим эту часть затрат как c_s . Согласно теории управления запасами, за интервал времени Θ существует некоторый запас вагонов N , который «хранится» на станции [9]. Необходимо определить оптимальное количество вагонов в группе n , при котором сумма затрат от подачи вагонов и непроизводительного простоя была бы минимальной. Однако число вагонов в группе имеет на практике некоторые ограничения, подача не может

осуществляться без вагонов и ограничивается вместимостью пути портового терминала и мощностью маневрового локомотива. Следовательно, $1 \leq n \leq 60$. Период пополнения запаса обозначим T .

Средний уровень запаса за период T равен $n/2$.

На рис. 1 видно, что затраты на непроизводительный простой за период T равны $1/2nc_sT$. Тогда сумма затрат в расчете на одну подачу составит

$$C_n = c_l + \frac{1}{2}nc_sT.$$

Число подач можно определить по формуле

$$r = \frac{N}{n} = \frac{\Theta}{T}.$$

Таким образом, можно рассчитать общие затраты за время Θ :

$$\begin{aligned} \Gamma &= \left(c_l + \frac{1}{2}nc_sT \right) r = \\ &= \left(c_l + \frac{1}{2}nc_sT \right) \frac{N}{n} = \\ &= c_l \frac{N}{n} + \frac{NT}{2}c_s = \frac{Nc_l}{n} + \frac{\Theta c_s}{2}n. \end{aligned}$$

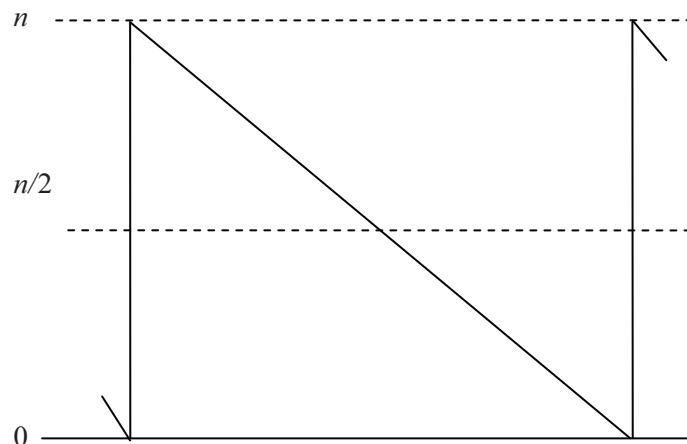


Рис. 1. Уровень запаса

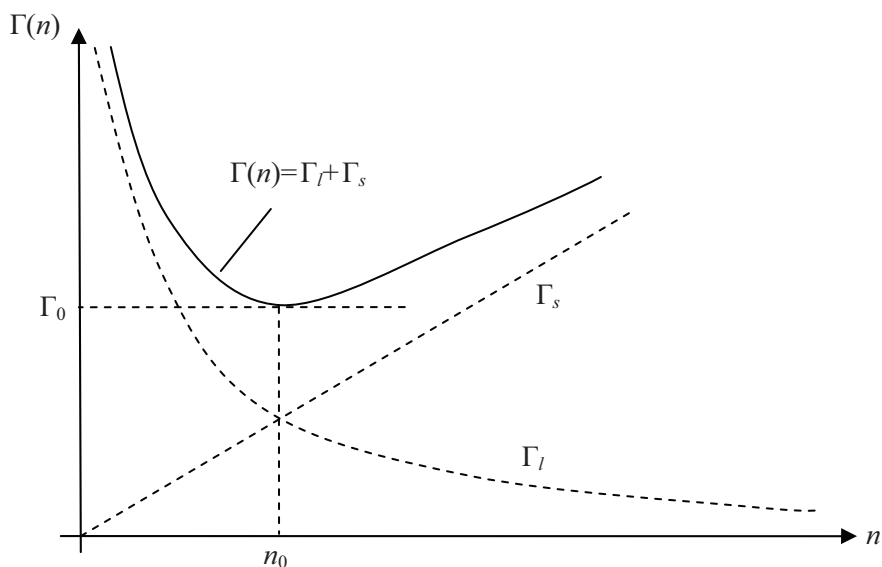


Рис. 2. График функции затрат

Следовательно, Γ – это функция переменной величины n при определенных параметрах N, Θ, c_l и c_s , равная

$$\Gamma(n) = \frac{Nc_l}{n} + \frac{\Theta c_s}{2} n.$$

Можно представить:
– общие затраты на подачу вагонов на пути портового терминала

$$\Gamma_l = \frac{Nc_l}{n};$$

– общие затраты на непроизводительный простой или «хранение» вагонов на станции

$$\Gamma_s = \frac{1}{2} \Theta c_s n.$$

На рис. 2 показан вид функций Γ_l и Γ_s .
Необходимо найти минимальное значение функции $\Gamma(n)$:

$$\Gamma_l \Gamma_s = \frac{1}{2} N \Theta c_l c_s = \text{const.}$$

Таким образом, значение суммы $\Gamma_l + \Gamma_s$ будет минимальным, когда соблюдается равенство $\Gamma_l = \Gamma_s$ или

$$\frac{Nc_l}{n} = \frac{\Theta c_s}{2} n.$$

Следовательно, число вагонов в подаче

$$n = n_0 = \sqrt{2 \frac{Nc_l}{\Theta c_s}}$$

является искомым и оптимальным.
Период времени

$$T = T_0 = \sqrt{2 \frac{\Theta c_l}{Nc_s}} = \frac{\Theta}{N} n_0$$

и

$$\Gamma_0 = \Gamma(n_0) = \sqrt{2N\Theta c_l c_s}.$$

Бесконечно малое приращение функции $\Gamma(n)$ наблюдается, если число вагонов в подаче изменяется в пределах от $n_0 - 10\%$ до $n_0 + 10\%$, выражается дифференциалом

$$d\Gamma = \Gamma' dn = \frac{1}{2} \Theta c_s - \frac{Nc_l}{n^2}.$$

Тогда

$$\delta\Gamma = \frac{1}{2} [\Gamma(0,9n_0) + \Gamma(1,1n_0) - 2\Gamma(n_0)],$$

$$\frac{\delta\Gamma}{\Gamma_0} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Gamma(0, 9n_0) + \Gamma(1, 1n_0)}{\Gamma_0} \right) - 1.$$

Для станции с числом путей, равным 6, и вместимостью 50 вагонов запас составит $N = 300$ вагонов. Затраты на подачу подвижного состава на пути портового терминала регулируются договором на эксплуатацию пути необщего пользования [10] и «Тарифным руководством № 3» [11].

Библиографический список

1. Маликов О. Б. Деловая логистика / О. Б. Маликов. – СПб. : Политехника, 2003. – 223 с.
2. Маликов О. Б. Классификация, иерархия и идентификация объектов терминально складской инфраструктуры / О. Б. Маликов, О. Д. Покровская // Транспорт : наука, техника, управление. – 2017. – № 8. – С. 13–21.
3. Смехов А. А. Основы транспортной логистики : учебник для вузов / А. А. Смехов. – М. : Транспорт, 1995. – 197 с.
4. Единый сетевой технологический процесс железнодорожных грузовых перевозок. – Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 28.12.2012 г. № 2786 р. – URL : <https://docplayer.ru/35225030-Edinyy-setevoy-tehnologicheskij-process-zheleznodorozhnyh-gruzovyh-perevozok.html> (дата обращения : 27.08.2019).
5. Салимова Т. А. Управление качеством : учебник по специальности «Менеджмент организации» / Т. А. Салимова. – М. : Омега-Л, 2013. – 376 с.
6. 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.
7. Никифорова Г. И. Исследование проблем деятельности операторских компаний в управлении вагонным парком / Г. И. Никифорова // Профессиональное образование, наука и инновации в XXI веке : сб. трудов XII Санкт-Петербургского конгресса. – СПб. : ПГУПС, 2018. – С. 172–173.
8. Канке А. А. Логистика : учебник / А. А. Канке, И. П. Кошечая. – М. : ИНФРА-М, 2012. – 384 с.
9. Стерлигова А. Н. Управление запасами в цепях поставок : учебник / А. Н. Стерлигова. – М. : ИНФРА-М, 2013. – 430 с.
10. Никифорова Г. И. Документооборот в железнодорожно-водном транспортном узле / Г. И. Никифорова // Сб. «Неделя науки–2004» / под ред. В. В. Сапожникова, Л. Н. Павлова. – СПб. : ПГУПС, 2004. – С. 130–132.
11. Правила применения сборов за дополнительные операции, связанные с перевозкой грузов на федеральном железнодорожном транспорте (Тарифное руководство № 3) : постановление от 19 июня 2002 г. № 35/15 (с изм. и доп.). – URL : http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&id=1399#5968 (дата обращения : 27.08.2019).

Дата поступления: 28.08.2019

Решение о публикации: 06.09.2019

Контактная информация:

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

Interaction of rail and maritime transport in the delivery supply chain of overseas trade cargo traffic

G. I. Nikiforova

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

For citation: Nikiforova G. I. Interaction of rail and maritime transport in the delivery supply chain of overseas trade cargo traffic. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 3, pp. 339–346. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-339-346 (In Russian)

Summary

Objective: Perfecting the parameters of interaction of rail and maritime transport under modern conditions in the delivery supply chain of overseas trade cargo traffic, including drafting efficiency function of supply chain expenditure; research into the railway station/sea port link in the supply chain; definition of the number of the wagons in an order from the tracks of a railway station adjacent to the port to private tracks of a sea port terminal as a link in the supply chain; calculation of the optimum number of wagons per order from the technological and economic side. **Methods:** Drafting efficiency function of expenditure including the stages of transportation of cargo flow through the railway network, at the junction point of the interaction of rail and maritime transport, of transportation by maritime transport. The Pareto method is used for classification of wagon fleet. Inventory theory is used, wherein wagons constitute inventory. **Results:** The need for perfecting the supply chain parameters is outlined. Calculation formula for the expenditure efficiency function is deduced. An element of the expenditure efficiency function, pertaining to the interaction of a railway station and sea port terminal regarding the number of wagons per order, is studied. **Practical importance:** The paper presents a method for defining the optimum number of wagons per order from the tracks of a railway station adjacent to a port to the tracks of a sea port terminal, depending on the station's wagon inventory, duration of time between orders and the expenses per order. Wagon fleet is regarded in the context of management of an operator company, with a synthetic criterion of classification for differentiation between the most significant groups identified.

Keywords: Interaction of rail and maritime transport, supply chain link, overseas trade cargo flow, optimum number of wagons per order, inventory theory, expenditure efficiency function, Pareto method, ABC-classification.

References

1. Malikov O. B. *Delovaia logistika [Business logistics]*. Saint Petersburg, Politekhnik Publ., 2003, 223 p. (In Russian)
2. Malikov O. B. & Pokrovskaya O. D. Klassifikatsiia, ierararkhiia i identifikatsiia ob'ektov terminal'no-skladskoi infrastruktury [Classification, hierarchy and identification of terminal and warehousing infrastructure]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie [Transport: science, technology, management]*, 2017, no. 8, pp. 13–21. (In Russian)
3. Smekhov A. A. *Osnovy transportnoi logistiki. Uchebnyk dlia vuzov [Introduction to transport logistics. University study guide]*. Moscow, Transport Publ., 1995, 197 p. (In Russian)
4. *Edinyi setevoi tekhnologicheskii protsess zheleznodorozhnykh gruzovykh perevozok [Single networking technical process of rail cargo transportation]*. Approved by Russian Railways JSC order N 2786-r, dated Dec. 28, 2012. Available at: <https://docplayer.ru/35225030-Edinyi-setevoy-tehnologicheskii-process-zheleznodorozhnykh-gruzovykh-perevozok.html> (accessed: 27.08.2019). (In Russian)

5. Salimova T.A. *Upravlenie kachestvom*. Uchebnik po spetsial'nosti "Menedzhment organizatsii" [*Quality management*. Study guide for corporate management students]. Moscow, Omega-L Publ., 2013, 376 p. (In Russian)
6. Nikiforova G.I. *Vzaimodeistvie zheleznodorozhnogo i morskogo transporta pri peredache konteyneropotoka na osnove printsipov logistiki* [*Interaction of rail and maritime transport in transferring container flows on the basis of logistics principles*]. Diss. ...Cand. Eng., specialty: 05.22.08. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2005, 195 p. (In Russian)
7. Nikiforova G.I. Issledovanie problem deiatel'nosti operatorskikh kompanii v upravlenii vagonnym parkom [A study into working problems of operator companies in managing wagon fleet]. *Professional'noe obrazovanie, nauka i innovatsii v XXI veke*. Sbornik trudov XII Sankt-Peterburgskogo kongressa [*Professional education, science and innovations in the 21st century*. Coll. Papers of the 12th St. Petersburg congress]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2018, pp. 172–173. (In Russian)
8. Kanke A.A. & Koshevaia I.P. *Logistika*. Uchebnik [*Logistics*. Study guide]. Moscow, INFRA-M Publ., 2012, 384 p. (In Russian)
9. Sterligova A.N. *Upravlenie zapasami v tsepiakh postavok*. Uchebnik [*Inventory management in supply chains*. Study guide]. Moscow, INFRA-M Publ., 2013, 430 p. (In Russian)
10. Nikiforova G.I. Dokumentooborot v zheleznodorozhno-vodnom transportnom uzle [Document flow in rail and water transport hub]. *Nedel'na nauka 2004* [*Science week 2004*]. Coll. papers. Ed. by V.V. Sapozhnikov and L.N. Pavlov. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2004, pp. 130–132. (In Russian)
11. *Pravila primeneniia sborov za dopolnitel'nye operatsii, svyazannye s perevozkoj грузов na federal'nom zheleznodorozhnom transporte (Tarifnoe rukovodstvo no. 3)* [*Rules for applying charges for additional operations related to cargo transportation on federally-owned rail transport (Tariff guide N 3)*], Federal Tariff Service order N 35/15 (amended and updated), issued on Jun. 19, 2002. Available at: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&id=1399#5968 (accessed : 27.08.2019). (In Russian)

Received: August 28, 2019

Accepted: September 06, 2019

Author's information:

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

УДК 656.073:658.8

Категория «идеальный терминал» как способ комплексной оценки логистического объекта

О. Д. Покровская, Т. С. Титова

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

Для цитирования: Покровская О. Д., Титова Т. С. Категория «идеальный терминал» как способ комплексной оценки логистического объекта // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 3. – С. 347–360.

DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-347-360

Аннотация

Цель: Разработать концептуально-теоретическую категорию «идеальный терминал», определяющую параметры состояния и функциональный режим работы логистического объекта. **Методы:** Применяются методы системного анализа, логистики, синергетики, кластерного анализа, теории множеств, теории складских систем, теория терминалистики. **Результаты:** Предложена категория «идеальный терминал», дано параметрическое и теоретическое описание наилучшего режима работы логистического объекта как «идеального терминала». Математически описан режим «идеальный терминал». **Практическая значимость:** Приведенная методика позволяет учесть целый комплекс различных параметров и факторов, влияющих на режим работы и состояние типичного логистического объекта. Категория «идеальный терминал» может использоваться при решении управленческих задач стратегического и тактического ракурсов, например, в вопросах планирования развития, проектирования, модернизации и эксплуатации, а также при планировании и оценке деятельности логистических объектов, работающих на железнодорожном транспорте. Применение в терминально-логистическом бизнесе ОАО «РЖД» такой категории как «идеальный терминал» повысит инвестиционную привлекательность работающей терминальной сети путем адаптивного управления режимом работы логистических объектов с «наилучшими» параметрами состояния. Методика позволяет проводить комплексную оценку операционной терминально-складской деятельности грузового терминала как логистического объекта для установления граничных стадий развития и выбора рационального режима его дальнейшего функционирования. Предлагаемая методика может быть полезна компании ОАО «РЖД» при контроле и оценке деятельности терминально-складской инфраструктуры, доля которой в современном портфеле бизнеса ОАО «РЖД» составляет не менее 20%.

Ключевые слова: Логистический объект, идеальный терминал, суперкритерий, комплексная оценка, эволюционно-функциональное развитие, режим работы, терминально-складская инфраструктура.

Актуальность концепции «идеальный терминал»

Ключевым элементом логистического объекта (ЛО) является терминал. Категория «идеальный терминал» необходима для установления «граничных» стадий функционирования и развития ЛО любого типа при комплексной

оценке его деятельности. Цель – однозначное определение «идеальных» («наилучших») функциональных условий режима работы и параметров состояния ЛО. Можно полагать, что применение категории «идеальный терминал» обеспечит принятие рациональных решений по созданию новых и реконструкции действующих ЛО, а также комплексно оценит

текущее состояние и показатели операционной логистической деятельности терминалов, работающих на сети Холдинга «РЖД».

Вопросы оптимизации структуры ЛО изучались такими отечественными учеными как А. А. Смехов, П. А. Козлов, Б. М. Лапидус, А. М. Гаджинский, В. М. Николашин, В. В. Дыбская, Л. Б. Миротин, О. Б. Маликов, С. М. Резер, С. Ю. Елисеев, Т. А. Прокофьева и др.

В транспортной литературе известны следующие подходы к типологии ЛО: железнодорожный (ЛО – транспортный узел) [1–7]; технический проектировочный (ЛО – транспортно-складской объект) [8–12]; экономико-логистический (ЛО – географический объект, поставщик логистических услуг) [13–19]. При этом недостаточно исследований, цель которых – построение интегрированной системы оценки параметров деятельности ЛО для отыскания наилучших режимов его эксплуатации.

Об актуальности принятия эффективных решений на любой стадии развития и эксплуатации ЛО при сохранении максимально высокого уровня реализуемого сервиса свидетельствуют «расширение» терминальной сети Холдинга «РЖД», а также рост требований клиентов к комплексности предоставляемого на ЛО сервиса.

К основной задаче работы относятся характеристика концепции и формулирование категории «идеальный терминал» с учетом принципов организации и параметрической структуры типового ЛО.

ЛО – это транспортно-складская система (ТСС) по обеспечению всех видов операционной терминальной деятельности, состоящая из взаимосвязанных функциональных модулей и реализующая сквозную комплексную услугу по доставке грузов (товаров) от начального до конечного клиента.

Категорией «идеальный терминал» будем определять соответствие состояния ЛО (его режима функционирования) ряду обязательных условий. Для формирования и описания этой категории были использованы модели и

методы теории систем, множеств, управления запасами, логистики, системного анализа и математического моделирования, принятия решений, а также авторские теории складских систем и терминалистики.

Особенности категории «идеальный терминал»

Введение категории «идеальный терминал» определяется следующими генеральными направлениями:

1) определение «граничных» стадий в жизненном цикле различных ЛО (по авторской классификации);

2) концептуальная поддержка проектирования, развития, эксплуатации и оценки ЛО;

3) математическое выражение с построением экономико-математических моделей режима работы ЛО, что позволит отыскать в реальных условиях эксплуатации режим работы ЛО, необходимый и достаточный для высококачественной терминальной переработки грузов;

4) разработка принципов функционирования ЛО с использованием категории «идеальный терминал», что даст возможность выделить и уточнить необходимые и достаточные условия, в которых ЛО способен приносить стабильную прибыль владельцу.

Подходы к решению многокритериальных оптимизационных задач, одной из которых является задача проектирования и последующей эксплуатации ЛО с наилучшими параметрами, могут быть с «обобщенным критерием» оптимизации и с применением «пороговой оптимизации».

Подход с «обобщенным критерием» имеет ряд недостатков, а именно:

– задача поиска оптимальных решений приводится к однокритериальному виду, что снижает альтернативность и адаптивность отыскания «наилучших» вариантов (поиск экстремума не дает оптимума из-за противоречивости критериев);

– применение «весовых» коэффициентов повышает субъективность оценки и последую-

щих управленческих решений за счет участия экспертов;

– значимые критерии предоставляются относительным (безразмерным) вариантом, что требует знания пределов их изменений, которые зачастую в процессе оптимизации остаются неизвестными.

Подход «пороговой» оптимизации связан с отысканием оптимизационного решения путем полного или частичного «перебора» всех альтернативных элементов множества решений, что зачастую объективно не реально выполнить [20].

Помимо перечисленных, известны и экспертные методы. Однако сложность их использования в процессах оптимизации сложных транспортно-складских систем связана с определением «веса» и последующей балльной оценкой по «неформализуемым» критериям. Это делает полученные решения «субоптимальными».

Следует отметить, что на практике бизнесу не требуются именно оптимальные решения, тем более, что в большинстве своем они фактически не реализуемы в условиях «турбулентной» экономики. «Максимум прибыли и минимум затрат» – сегодня этот принцип становится измерителем «успешности» любого управленческого решения, что приводит к упрощенческому подходу при отыскании наилучшего варианта функционирования, проектирования или развития ЛО.

В настоящем исследовании предлагается интегрированная методика комплексной оценки ЛО. Методика может универсально применяться при разных вариантах оптимизации работы ЛО, причем лишена большинства из перечисленных выше недостатков. Целью данной методики является формулировка тех ключевых параметров, которые конкретно и однозначно определяют параметры наилучшего режима функционирования и состояния «идеального терминала». Это позволяет изучать работу и комплексно оценивать эффективность ЛО в терминальной сети с точки зрения логистики, синергетического и системного подходов.

Категория «идеальный терминал» будет использована здесь в качестве «суперкритерия» для проведения определенной «свертки» критериев в единственный критерий при обязательном выполнении ограничивающих условий. Такая концептуально-теоретическая категория позволяет приблизить состояние железнодорожного ЛО к целевому в «фокусе» интересов и нужд ОАО «РЖД» как владельца терминальной сети.

«Идеальность» режима работы ЛО означает отсутствие у ЛО всех типичных недостатков работы, которые имеют реально работающие на сети терминалы. При этом современный рынок не требует непременно достижения режима «идеального терминала», что и практически невозможно. Исходя из этого, в категории критериев «идеальности» большая часть является исключительно рекомендуемыми, при соблюдении которых не на 100%, а, допустим, уже на 65–70%, улучшает показатели деятельности терминала в целом.

Категория «идеальный терминал» существует в нескольких аспектах:

1) как целевая функция, направленность которой соответствует эволюционно-функциональному развитию ЛО;

2) как теоретико-формализованная модель, универсально применимая для разных подходов к типологии ЛО;

3) как «движущая» сила эволюции ЛО (в эволюционно-функциональной теории терминалистики), подробно изложенной в работах [21–26]) – необходимое и достаточное условие трансформации ЛО в объект качественно нового уровня развития.

Концепция «идеального терминала» может быть широко применима при решении управленческих задач терминально-логистического бизнеса, что даст прикладные инструменты для принятия высокоэффективных управленческих решений в масштабе экономики страны. Использование теории функционально-логистического развития терминально-складской инфраструктуры и «идеального терминала» позволит проводить логистический аудит и комплексно оценивать работу ЛО на

соответствие параметров состояния режиму «идеального терминала». В свою очередь, это отразит «узкие места» в операционной деятельности ЛО.

Эволюционно-функциональный подход был подробно описан в работе [22], согласно которому категория «идеальный терминал» определяет вектор эволюции как функциональной (основной), так и технической (обеспечивающей) подсистемы ЛО.

Согласно подходу теории синергетики, «идеальный терминал» соответствует точке бифуркации, в которой реализуется установление «нового порядка» всех элементов самоорганизующейся системы, «переход» системы на качественно новый уровень.

Согласно подходу общей теории систем, «идеальный терминал» выступает переходным моментом от системы «низшего» к системе «высшего» иерархического порядка за счет действия эволюционно-функциональных «движущих» факторов.

Согласно подходу теории принятия решений, «идеальный терминал» – точка «невозврата» к предыдущему состоянию, создание предпосылок для преобразования в новый формат ведения терминально-логистической деятельности.

Известная категория «оптимальный» терминал предполагает наличие у ЛО параметров, оптимизированных с помощью математических моделей и методов. Терминальная сеть представляет собой сложную технико-экономическую систему. При использовании одного критерия обычно в соответствии с теорией принятия решений предлагают некоторые комплексные критерии, которые при этом учитывают также влияние факторов различного характера. Следует отметить, что в таком случае многокритериальная задача оптимизации решается на основе теории принятия решений по ключевым показателям эффективности или по выборке из альтернативных вариантов (сценариев) развития.

Поиск параметров режима «идеального терминала» может быть дополнен и эвристическими, и описательными категориями.

Таким образом, режим «идеальный терминал» – это такое состояние ЛО, которое в полной мере отвечает интересам участников системы товародвижения.

В соответствии с предлагаемой концепцией методика достижения целевого параметрического состояния «идеального терминала» направлена на отыскание оптимальных решений для ЛО железнодорожного транспорта. При этом даже реализация целевых значений хотя бы некоторых параметров целевой функции из множества значимых для состояния ЛО уже позволит перейти ЛО на новый уровень.

«Идеальный» режим предполагает, что ЛО работает при максимальных значениях параметров состояния, а это зачастую нереализуемо, с одной стороны, и не рационально – с другой. Формулирование этой категории связано с ошибочным мнением многих грузовладельцев и владельцев ЛО при «гигантомании» в процессе застройки территории, строительстве складских комплексов, привлечения клиентов, закупки дорогостоящего оборудования, использования последних версий автоматизированных систем и др.

Поясним применение категории «идеальный», а не «оптимальный» терминал. «Оптimum» достигим при определенных реальных условиях, а «идеальность» – это случай совершенства, часто недостижимый в реальных условиях. Заметим, что режим «идеальный терминал» будет трансформироваться для разных цепей поставок, грузов, условий перевозки и складирования. С понятием «идеальный терминал» напрямую связаны вопросы, как расположить, как «связать» с экономикой региона, как терминал соответствует потребностям торговли в регионе и ее размещению.

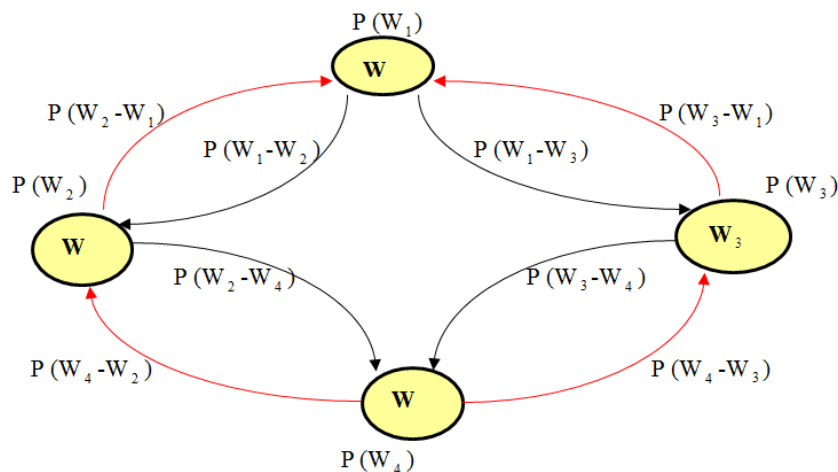
Эволюционно-функциональный подход и параметры состояния ЛО

Рассмотрим основные параметры, связанные с «идеальностью» работы ЛО: морфология терминальной сети в целом и логистической цепи в частности, характер «питающих»

терминал грузопотоков (с учетом закона их распределения), режим технической эксплуатации ЛО, экономико-географическое расположение ЛО.

Формализованно процесс функционирования ЛО показан на рисунке.

Такая модель состояний и переходов ЛО позволяет комплексно оценивать и оптими-



Граф состояний и переходов ЛО (в примере указаны 4 состояния W_1, W_2, W_3, W_4 и 8 переходов) и их вероятности [9]

зировать работу ЛО, которую в общем виде можно представить как матрицу вероятностей

$$P_{ij} = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1i} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2i} & \dots & P_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{j1} & P_{j2} & \dots & P_{ji} & \dots & P_{jn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{ni} & \dots & P_{nn} \end{pmatrix}.$$

Так, на главной диагонали показаны вероятности того, что ЛО не выйдет из состояний 1-го, 2-го, ..., n -го. Прочие элементы – это вероятность перехода ЛО из одного состояния в другое.

В эволюционно-функциональном развитии ЛО переход на стадию «идеальный терминал» осуществляется поэтапно, согласно следующей последовательности:

- 1) 10% – «не оптимальный» («спонтанных бизнес-решений»);
- 2) 20% – «рациональный» («бизнес-решения без достижения заданного объема прибыли»);

3) 60% – «частично оптимальный» («бизнес-решения имеют фрагментарный характер и точечное достижение оптимума»);

4) не менее 80% бизнес-решений на ЛО имеют оптимум – «оптимальный»;

5) «идеальный» – 100%-е достижение оптимума каждым функциональным модулем ЛО, что отражено в таблице (составлено на основе анализа работ [27–29]).

При этом трансформация ЛО из одного состояния в другое реализуется при активном воздействии внешних систем в процессе передачи и преобразования материальных и информационных потоков. Иными словами, функциональные и технологические элементы ЛО эволюционируют.

По оценке текущих параметров состояния ЛО в течение определенного времени можно судить об успешности решенных им задач эволюционно-функционального развития, а также о правильности принятых при его создании технологий, о целесообразности внесения изменений в его структуру.

Зачастую не всегда необходим режим 100% «идеального терминала» – достаточно и 60% удовлетворения требований «идеальности».

Состояния ЛО в эволюции к режиму «идеальный терминал»

№ этапа	Описание состояний (режимов) работы ЛО	Обозначение состояния ЛО	Вероятности состояний ЛО
1	10% – «не оптимальный» (спонтанные решения)	W_1	$P(W_1)$
2	20% – «рациональный» (решения имеют экономическое обоснование, но не реализуют плановых объемов прибыли)	W_2	$P(W_2)$
3	60% – «частично оптимальный» (решения отдельных вопросов организации работы ЛО решены на высоком уровне с достижением оптимума, однако имеются недостатки в работе ЛО)	W_3	$P(W_3)$
4	Не менее 80% решений на ЛО достигают оптимума – «оптимальный»	W_4	$P(W_4)$

Однако есть и то состояние, к которому следует стремиться: «идеальный терминал». При этом реализация режима работы ЛО «идеальный терминал» не всегда определяется экстремумом целевых функций. Это связано с тем, что, к примеру, максимальное использование мощности складского оборудования и площади (на 100% загрузки) приведет к отсутствию страховых запасов, с одной стороны, и работе оборудования и техники на критических значениях параметров – с другой.

Последнее вызовет повышение доли эксплуатационных издержек владельца ЛО и уход клиентов в случае сбоев в поставке груза, т. е. при невыполненном хотя бы одном из «восьми правил» логистики.

Предлагается категорией «идеальный терминал (the best terminal, IT)» обозначить такое состояние ЛО i -го типа, $X(ЛО_i)$, обладающего рядом параметров, при котором достигается максимальная общая эффективность.

Формализация категории «идеальный терминал»

Текущее функциональное состояние ЛО, соответствующее уровню эволюции (согласно работам [11, 21, 22]), имеет вид

$$IT = [X(ЛО_i) \in \{F_C^T; F_C^K\}] \rightarrow \max(E),$$

$$IT' = [X(ЛО_i) \in \{F_C^\Phi\}] \rightarrow \min(E'),$$

где IT – целевая функция «идеального терминала» по максимизации составляющих – эффективность E ; IT' – целевая функция «идеального терминала» по минимизации составляющих – эффективность E' ; F_C^T – целевая функция технического вида для ЛО; F_C^K – целевая функция качественного вида для ЛО; F_C^Φ – целевая функция финансового вида для ЛО.

Рассмотрим режим операционной деятельности ЛО с применением концепции «идеальный терминал»:

$$IT = X(ЛО_i) \parallel E \rightarrow IT,$$

то E – эффективность ЛО – можно описать следующим множеством параметров состояния «идеального терминала»:

$$E \in \left\{ \begin{array}{l} L_{ITi}; Q_{ITi}; A_{ITi}; Z_{qsITi}; WT_{ITi}; \\ SU_{ITi}; G_{ITi}; S_{\text{хр пол } ITi}; R_{\text{ПРМ}}; \\ R_{\text{ГР}}; E_{\text{скл}}; T_{\text{раб}}; T_{\text{ГР}}; Fr \end{array} \right\},$$

здесь L_{ITi} – дислокация ЛО, км; Q_{ITi} – предельная грузоперерабатывающая способность ЛО (базовой станции), работающего в режиме «идеального терминала», т/сут. (конт./сут.,

подд./сут.); A_{IT_i} – уровень автоматизации внутрискладских потоков (дороговизна программного обеспечения влечет за собой и удорожание себестоимости грузовых операций на ЛО); $Z_{qs\ IT_i}$ – оснащенность ЛО эффективными машинами и механизмами, ед.; WT_{IT_i} – своевременность приема и выдачи груза при требуемом режиме хранения (warehousing, timeliness); SU_{IT_i} – персонафицированность обслуживания клиентов и их грузов; G_{IT_i} – сбалансированность величины завоза и вывоза груза с/на ЛО по усредненным данным, т/сут. (конт/сут., подд/сут.); $S_{хр\ пол\ IT_i}$ – «полнота» использования площади хранения; $R_{ПРМ}$ – «полнота» загрузки ресурсов машин, механизмов и иной техники, работающей на ЛО; $R_{гр}$ – минимальная величина запаса грузов на ЛО; $E_{скл}$ – «полнота» использования объема ЛО; $T_{раб}$ – прибытие и отправление без очередей транспортных средств и простоя техники; $T_{гр}$ – минимальная величина среднесуточных простоев транспорта под грузовыми операциями; Fr – адекватная внешним условиям величина страхового запаса при наличии резерва площади хранения на ЛО.

Режим функционирования ЛО

Такой режим, согласно требованиям категории «идеальный терминал», предполагает состояние ЛО ($X(ЛО_i)$) со следующими атрибутами при ограничениях целевой функции ИТ (по работам [27–29]):

- 1) соответствие потребности рынка (региона) при нахождении ЛО в зоне обслуживания;
- 2) нахождение в месте зарождения или в месте максимального раздробления грузопотока, или в промежуточном месте: на удалении 2/3 расстояния от производства или 1/3 от места потребления – зависит от распределения грузопотоков на товаропроводящей сети;
- 3) умеренная автоматизация складских процессов (если будет очень дорогим, то дорогой будет и грузопереработка);
- 4) соответствующее объемам и функциям техническое оснащение;

5) обеспечение для каждого груза соответствующего режима хранения и своевременной приемки/выдачи груза клиентам в установленные сроки;

6) предоставление уникальной услуги с индивидуальным обеспечением клиента информационной и сопроводительной транспортно-логистической поддержкой при доставке груза от начального отправителя до конечного получателя;

7) равенство среднего завоза и вывоза груза с/на терминал;

8) не менее 80% использования полезной площади хранения;

9) не менее 80% загрузка ресурса и грузоподъемности погрузочно-разгрузочного оборудования;

10) минимальный запас груза;

11) полное использование складского объема;

12) прибытие и отправление подвижного состава видов транспорта по расписанию (работа без очередей транспортных средств и без простоя техники);

13) минимальные продолжительности простоя подвижного состава под грузовыми операциями;

14) наличие достаточной мощности на ЛО для комплектации по заявке клиента (быстрый отклик на запрос).

Сфера практического применения полученных результатов

Категория «идеальный терминал» может быть применима:

– как инструментарий комплексной оценки операционной деятельности ЛО в процессе эксплуатации для совершенствования технологии его работы и рационального планирования дальнейшего развития;

– как способ рационального проектирования и поэтапного планирования развития ЛО различного типа.

При этом по математическому виду параметрической структуры ЛО возможно идентифи-

цировать тип объекта терминально-складской инфраструктуры и его функциональную роль цепи доставки.

Категория «идеальный терминал» позволяет отыскать «наилучший» режим эксплуатации и развития ЛО, а также адекватно оценивать и планировать работу терминально-складской инфраструктуры ОАО «РЖД» в целом, включая вопросы стыка видов транспорта и взаимодействия с клиентами [30–35].

Выводы

Категория «идеальный терминал» в данной работе охарактеризована как наилучший, рекомендуемый режим работы любого ЛО, приведен перечень принципов функционирования режима «идеального терминала». Описывается также параметрическая структура типового ЛО, на основе которой могут быть реализованы модели и методы оптимизации его функционирования.

Разработаны процедуры проектирования и поэтапного планирования развития ЛО как «идеального терминала» с указанием тех эволюционно-функциональных условий, в которых терминальная сеть Холдинга «РЖД» обеспечит желаемые величины прибыльности транспортно-логистического бизнеса.

В качестве предмета последующего исследования может выступить: совершенствование теории построения сетевых графов структуры ЛО и выбора режима функционирования ЛО [36] с учетом логистического нормирования [37], а также экологической составляющей деятельности, включая оценку экологических рисков и комплексную оценку влияния новых технологий на геоэкологическую обстановку [38–43]; моделей и методов управления потоковыми процессами, рисками и инновационным развитием ЛО [44–46].

Библиографический список

1. Ефименко Ю.И. Железнодорожные станции и узлы / Ю.И. Ефименко, В.И. Апатцев, Н.В. Правдин и др. ; под ред. В.И. Апатцева, Ю.И. Ефименко. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2014. – 450 с.
2. Правдин Н.В. Проектирование инфраструктуры железнодорожного транспорта (станции, железнодорожные и транспортные узлы) / Н.В. Правдин, С.П. Вакуленко, А.К. Головнич и др. ; под ред. Н.В. Правдина, С.П. Вакуленко. – М. : Маршрут, 2014. – 1086 с.
3. Бройтман Э.З. Железнодорожные станции и узлы / Э.З. Бройтман. – М. : Маршрут, 2004. – 372 с.
4. Числов О.Н. Научно-методический комплекс классификации железнодорожных узлов (на примере Северо-Кавказской железной дороги – филиала ОАО «РЖД») / О.Н. Числов, В.В. Хан // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С. 24–28. – URL : <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=16956> (дата обращения : 20.08.2016).
5. Савченко И.Е. Железнодорожные станции и узлы / И.Е. Савченко, С.В. Земблинов, И.И. Страковский. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1967. – 467 с.
6. Самуйлов В.М. Практика и эффективность формирования транспортно-логистических кластеров / В.М. Самуйлов, О.Д. Покровская // Вестн. Урал. гос. ун-та путей сообщения. – 2016. – № 4 (32). – С. 76–88.
7. Титова Т.С. Понятийный аппарат терминалистики / Т.С. Титова, О.Д. Покровская // Бюл. результатов науч. исследований. – 2018. – Вып. 2. – С. 29–43.
8. Балалаев А.С. Транспортно-грузовые системы железных дорог : учеб. пособие / А.С. Балалаев, И.А. Чернышова, А.Ю. Костенко. – Хабаровск : Изд-во Дальневосточн. гос.ун-та путей сообщения, 2006. – 108 с.
9. Титова Т.С. Междисциплинарное положение теории терминалистики / Т.С. Титова, О.Д. Покровская // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2018. – Т. 15, вып. 2. – С. 248–260.
10. Экономика России : прошлое, настоящее, будущее : монография / под общ. ред. Н.А. Адамова. – М. : ИТКОР, 2014. – 248 с. (см. с. 116–143).
11. Покровская О.Д. Моделирование системы организации перевозочного процесса через термини-

нальную сеть / О. Д. Покровская // Изв. Транссиба. – 2017. – № 1 (29). – С. 118–130.

12. Гаджинский А. М. Современный склад. Организация, технологии, управление и логистика / А. М. Гаджинский. – М. : ТК Велби ; Проспект, 2007. – 176 с.

13. Елисеев С. Ю. Система логистического управления взаимодействием с морскими и речными портами и другими видами транспорта : монография / С. Ю. Елисеев. – М. : ВИНТИ РАН, 2005. – 96 с.

14. Прокофьева Т. А. Логистические центры в транспортной системе России : учеб. пособие / Т. А. Прокофьева, В. И. Сергеев. – М. : Издат. дом «Экономическая газета», 2012. – 522 с.

15. Миротин Л. Б. Логистика, технология, проектирование складов, транспортных узлов и терминалов / Л. Б. Миротин, А. В. Бульба, В. А. Демин. – Ростов н/Д. : Феникс, 2009. – 408 с.

16. Воскресенский И. В. Алгоритмизация комплексного расчета параметров терминальной сети региона / И. В. Воскресенский, О. Д. Покровская // Транспорт Урала. – 2011. – № 1 (28). – С. 10–13.

17. Дыбская В. В. Управление складированием в цепях поставок / В. В. Дыбская. – М. : Альфа-Пресс, 2009. – 720 с.

18. Логистика : учеб. пособие / под ред. Б. А. Аникина. – М. : ИНФРА-М, 1999. – 327 с.

19. Балалаев А. С. Транспортно-логистическое взаимодействие при мультимодальных перевозках / А. С. Балалаев, Р. Г. Леонтьев, Т. А. Попова. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2012. – 268 с.

20. Попов А. П. Оптимизация технологических процессов / А. П. Попов, Т. А. Попова // Мир транспорта. – 2015. – Т. 13, № 5. – С. 16–25.

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

22. Маликов О. Б. Классификация, иерархия и идентификация объектов терминально-складской инфраструктуры / О. Б. Маликов, О. Д. Покровская // Транспорт : наука, техника, управление. – 2017. – № 8. – С. 13–21.

23. Коровяковский Е. К. Логистика терминалов : перспективное направление логистики / Е. К. Коровя-

ковский, О. Д. Покровская // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2015. – Вып. 3 (44). – С. 155–164.

24. Покровская О. Д. «Сбитый прицел» клиентоориентированности / О. Д. Покровская // РЖД-Партнер. – 20.06.2016.

25. Покровская О. Д. Классификация объектов железнодорожной терминально-складской инфраструктуры / О. Д. Покровская // Вестн. Урал. гос. ун-та путей сообщения. – 2017. – № 1 (33). – С. 70–83.

26. Pokrovskaya O. D. Chi terminelistica reale come una nuova direzione scientifica / O. D. Pokrovskaya // Italian Science Review. – 2016. – Vol. 1 (34). – P. 112–116.

27. Козлов П. А. К теории транспортных узлов / П. А. Козлов, В. Ю. Пермикин, Н. В. Кашеева // Транспорт Урала. – 2013. – № 4 (39). – С. 3–5.

28. Микони С. В. Многокритериальный выбор на конечном множестве альтернатив / С. В. Микони. – СПб. : Изд-во «Лань», 2009. – 156 с.

29. Вентцель Е. С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология / Е. С. Вентцель. – М. : Дрофа, 2004. – 208 с.

30. Самуйлов В. М. Интеграция региональной терминально-логистической сети в международные транспортные коридоры / В. М. Самуйлов, О. Д. Покровская, Т. П. Воскресенская // Инновационный транспорт. – 2013. – № 1 (7). – С. 33–37.

31. Воскресенская Т. П. Методика и алгоритмизация принятия решений по формированию терминальной сети в регионе / Т. П. Воскресенская, О. Д. Покровская // Вестн. Урал. гос. ун-та путей сообщения. – 2010. – № 3 (7). – С. 74–84.

32. Котляренко А. Ф. Взаимодействие на транспортных стыках при внешнеторговых перевозках / А. Ф. Котляренко, П. В. Куренков // Железнодорожный транспорт. – 2002. – № 2. – С. 48–52.

33. Куренков П. В. Взаимодействие грузовладельца с причастными подразделениями при экспортно-импортных железнодорожных перевозках через морские порты / П. В. Куренков, А. Ф. Котляренко // Бюл. транспортной информации. – 1997. – № 6. – С. 34–38.

34. Куренков П. В. Логистический подход к управлению грузопотоками / П. В. Куренков // Железнодорожный транспорт. – 1997. – № 3. – С. 13–15.

35. Стеценко В. В. Коммерческое взаимодействие транспортных систем / В. В. Стеценко, П. В. Куренков // Железнодорожный транспорт. – 1998. – № 10. – С. 31–36.
36. Покровская О. Д. Методика построения сетевого графа структуры логистического объекта / О. Д. Покровская, О. Б. Маликов // Мир транспорта. – 2017. – Т. 25, № 1. – С. 18–27.
37. Покровская О. Д. Анализ системы нормирования на железнодорожном транспорте с позиций логистики и клиентоориентированности / О. Д. Покровская, О. Б. Маликов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2017. – Вып. 2 (51). – С. 187–199.
38. Титова Т. С. Система управления техносферной безопасностью / Т. С. Титова, Р. Г. Ахтямов. – СПб. : ПГУПС, 2017. – 23 с.
39. Титова Т. С. Методология комплексной оценки влияния новых технологий на геоэкологическую обстановку / Т. С. Титова // Вестн. Всерос. науч.-исслед. ин-та ж.-д. транспорта. – 2005. – № 5. – С. 2–5.
40. Титова Т. С. Технические решения по снижению шума от высокоскоростных железнодорожных магистралей / Т. С. Титова, А. Е. Шашурин, Ю. С. Бойко // Транспорт Российской Федерации. – 2015. – № 2 (57). – С. 30–35.
41. Титова Т. С. Подходы к обеспечению техносферной и экологической безопасности объектов транспорта / Т. С. Титова, Р. Г. Ахтямов, А. Н. Елизарьев, Е. Н. Елизарьева. – Уфа : Изд-во «Уфимск. гос. авиацион. технич. ун-т», 2017. – 72 с.
42. Титова Т. С. Экологические проблемы транспортного строительства / Т. С. Титова, А. А. Степанова // Техносферная и экологическая безопасность на транспорте (ТЭБТРАНС–2014) : материалы IV Междунар. науч.-практич. конференции. – СПб. : ПГУПС, 2014. – С. 202–204.
43. Сафронова А. А. Повышение экологической безопасности на основе системы экологического менеджмента (СЭМ) / А. А. Сафронова, Д. Г. Кахриманова // Инновационная экономика и современный менеджмент. – 2017. – № 2 (13). – С. 36–40.
44. Сафронова А. А. Управление рисками инвестиционного проекта / А. А. Сафронова, А. М. Атаев // Инновационная экономика : информация, аналитика, прогнозы. – 2012. – № 1–2. – С. 3–9.
45. Егоров А. Ю. Методологический подход к оптимизации управления потоковыми процессами / А. Ю. Егоров, А. А. Сафронова // Инновационная экономика : информация, аналитика, прогнозы. – 2012. – № 1–2. – С. 70–73.
46. Сафронова А. А. Инновации как основа циклического развития экономики / А. А. Сафронова // Евразийский союз ученых. – 2015. – № 10–5 (19). – С. 153–155.

Дата поступления: 21.08.2019

Решение о публикации: 30.08.2019

Контактная информация:

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

ТИТОВА Тамила Семеновна – д-р техн. наук, профессор; titova@pgups.ru

Category of “ideal terminal” as a method for integrated assessment of a logistical object

O. D. Pokrovskaya, T. S. Titova

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

For citation: Pokrovskaya O. D., Titova T. S. Category of “ideal terminal” as a method for integrated assessment of a logistical object. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 3, pp. 347–360. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-347-360 (In Russian)

Summary

Objective: To propose the conceptual and theoretical category of “ideal terminal” which defines status parameters and performance profile of a logistical object. **Methods:** Methods of general systems theory, logistics, synergetics, cluster analysis, theory of sets, warehousing systems theory, terminalistics theory are applied. **Results:** The category of “ideal terminal” is proposed. Parametrical and theoretical description of the optimum operating mode of a logistical object is provided. Mathematical description of the “ideal terminal” regime is developed. **Practical importance:** The proposed method provides integrated accounting of a whole number of parameters and factors which determine and influence the operation of a logistical object. The category of “ideal terminal” can be applied for solving managerial tasks of strategic and tactical dimensions, for example, in planning of development, designing, modernization, operation and evaluation of logistical objects working on railway transport. Application of the category of “ideal terminal” in the terminals and logistics business of the Russian Railways JSC would increase investment attractiveness of the existing terminal network by way of adaptive management of the regime of operation of logistical objects with the optimum status parameters. The method allows conducting integrated assessment of the operational terminal and warehousing operation of a cargo terminal as a logistical object for determination of boundary stages of development and selection of rational regime of further operation. The method proposed can be useful for the Russian Railways JSC in control and evaluation of operation of the terminal and logistics infrastructure, the share of which in today’s business portfolio of the Russian Railways JSC is at least 20 per cent.

Keywords: Logistical object, ideal terminal, super-criterion, integrated assessment, evolutionary and functional development, operating regime, terminal and warehousing infrastructure.

References

1. Efimenko Iu. I., Apattsev V. I., Pravdin N. V. et al. *Zheleznodorozhnye stantsii i uzly [Railway stations and hubs]*. Eds. by V. I. Apattsev, Yu. I. Efimenko. Moscow, Uchebno-metodicheskii tsentr po obrazovaniiu na zheleznodorozhnom transporte [Learning and teaching educational centre of railway transport] Publ., 2014, 450 p. (In Russian)
2. Pravdin N. V., Vakulenko S. P., Golovnich A. K. et al. *Proektirovanie infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta (stantsii, zheleznodorozhnye i transportnye uzly [Designing railway transport infrastructure (stations, rail and transport hubs)]*. Eds. by N. V. Pravdin, S. P. Vakulenko. Moscow, Marshrut Publ., 2014, 1086 p. (In Russian)
3. Broitman E. Z. *Zheleznodorozhnye stantsii i uzly [Railway stations and hubs]*. Moscow, Marshrut Publ., 2004, 372 p. (In Russian)
4. Chislov O. N. & Khan V. V. Nauchno-metodicheskii kompleks klassifikatsii zheleznodorozhnykh uzlov (na primere Severo-Kavkazskoi zheleznoi dorogi – filiala OAO “RZhD”) [Research and methodological set of railway hubs classification (on the example of the North Caucasus Railway, a branch of Russian Railways JSC)]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia [Modern problems of science and education]*, 2014, no. 6, pp. 24–28. Available at: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=16956> (accessed: 20.08.2016). (In Russian)
5. Savchenko I. E., Zemblinov S. V. & Strakovskii I. I. *Zheleznodorozhnye stantsii i uzly [Railway stations and hubs]*. 2nd ed., updated and expanded. Moscow, Transport Publ., 1967, 467 p. (In Russian)
6. Samuilov V. M. & Pokrovskaya O. D. Praktika i effektivnost’ formirovaniia transportno-logisticheskikh klasterov [Practice and efficiency of forming transport and logistics clusters]. *Vestnik Ural’skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia [Ural State University of Railway Transport Bulletin]*, 2016, no. 4 (32), pp. 76–88. (In Russian)
7. Titova T. S. & Pokrovskaya O. D. Poniatiinyi apparat terminalistiki [Conceptual framework of terminalistics]. *Biulleten’ rezul’tatov nauchnykh issledovaniia [Bulletin of scientific research results]*, 2018, iss. 2, pp. 29–43. (In Russian)
8. Balalaev A. S., Chernyshova I. A. & Kostenko A. Yu. *Transportno-gruzovye sistemy zheleznykh*

dorog. Uchebnoe posobie [Trailways transport and cargo systems. Study guide]. Khabarovsk, Far Eastern State Transport University Publ., 2006, 108 p. (In Russian)

9. Titova T. S. & Pokrovskaya O. D. Mezdistsiplinarnoe polozhenie teorii terminalistiki [Inter-disciplinary position of the terminalistics theory]. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia [Proceedings of Petersburg State Transport University]*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2018, vol. 15, iss. 2, pp. 248–260. (In Russian)

10. *Ekonomika Rossii: proshloe, nastoiashchee, budushchee: monografiia [Russia's economy: past, present, future: monograph]*. Under general editorship of N. A. Adamov. Moscow, ITKOR [Stock Movement and Wholesale Market Conditions Institute] Publ., 2014, 248 p. (see pp. 116–143). (In Russian)

11. Pokrovskaya O. D. Modelirovanie sistemy organizatsii perevozhnogo protsessa cherez terminal'nuu set' [Modelling of the system for organization of transportation process through network of terminals]. *Izvestiia Transsiba [Proceedings of the Trans-Siberian]*, 2017, no. 1 (29), pp. 118–130. (In Russian)

12. Gadzhinskii A. M. *Sovremennyi sklad. Organizatsiia, tekhnologii, upravlenie i logistika [Modern warehouse. Organisation, technologies, management and logistics]*. Moscow, TK Velbi, Prospekt Publ., 2007, 176 p. (In Russian)

13. Eliseev S. Yu. *Sistema logisticheskogo upravleniia vzaimodeistviem s morskimi rechnymi portami i drugimi vidami transporta: monografiia [System of logistical management of interaction with sea and river ports and other modes of transport: monograph]*. Moscow, VINITI RAN [All-Russian Institute of Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences] Publ., 2005, 96 p. (In Russian)

14. Prokof'eva T. A. & Sergeev V. I. *Logisticheskie tsentry v transportnoi sisteme Rossii. Uchebnoe posobie [Logistical centres in Russia's transport system. Study guide]*. Moscow, Ekonomicheskaiia Gazeta Publ., 2012, 522 p. (In Russian)

15. Mirotin L. B., Bul'ba A. V. & Demin V. A. *Logistika, tekhnologiia, proektirovanie skladov, transportnykh uzlov i terminalov [Logistics, technology, design of warehouses, transport hubs and terminals]*. Rostov-on-Don, Feniks Publ., 2009, 408 p. (In Russian)

16. Voskresenskii I. V. & Pokrovskaya O. D. Algoritmizatsiia kompleksnogo rascheta parametrov terminal'noi seti regiona [Algorithm development for complex calculation of parameters of a region's terminal network]. *Transport Urala [Urals Transport]*, 2011, no. 1 (28), pp. 10–13. (In Russian)

17. Dybskaia V. V. *Upravlenie skladirovaniem v tsepiakh postavok [Warehousing management in delivery chain]*. Moscow, Al'fa-Press Publ., 2009, 720 p. (In Russian)

18. *Logistika. Uchebnoe posobie [Logistics. Study guide]*. Ed. by B. A. Anikin. Moscow, INFRA-M Publ., 1999, 327 p. (In Russian)

19. Balalaev A. S., Leontiev R. G. & Popova T. A. *Transportno-logicheskoye vzaimodeistvie pri multimodalnykh perevozkah [Transport-logical interaction by the multimodal transports]*. Moscow, Uchebno-metodicheskii tsentr po obrazovaniuu na zheleznodorozhnom transporte [Learning and teaching educational centre of railway transport] Publ., 2012, 268 p. (In Russian)

20. Popov A. P. & Popova T. A. Optimizatsiia tekhnologicheskikh protsessov [Optimisation of technological processes]. *Mir transporta [World of transport]*, 2015, vol. 13, no. 5, pp. 16–25. (In Russian)

21. Malikov O. B. & Pokrovskaya O. D. Voprosy logisticheskoi ierarkhii zheleznodorozhnykh ob'ektov [Problems in logistical hierarchy of railway objects]. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia [Proceedings of Petersburg State Transport University]*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2016, iss. 4 (49), pp. 521–531. (In Russian)

22. Malikov O. B. & Pokrovskaya O. D. Klassifikatsiia, ierarkhiia i identifikatsiia ob'ektov terminal'no-skladskoi infrastruktury [Classification, hierarchy and identification of terminal and warehousing infrastructure]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie [Transport: science, technology, management]*, 2017, no. 8, pp. 13–21. (In Russian)

23. Koroviakovskii E. K. & Pokrovskaya O. D. Logistika terminalov: perpspektivnoe napravlenie logistiki [Logistics of terminals as a promising logistical area]. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia [Proceedings of Petersburg State Transport University]*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2015, iss. 3 (44), pp. 155–164. (In Russian)

24. Pokrovskaya O. D. "Sbityi pritsel" klientoorientirovannosti ["Unadjusted sight" of client focus]. *RZhD-Partner [Russian Railways – Partner]*, Jun. 20, 2016. (In Russian)
25. Pokrovskaya O. D. Klassifikatsiia ob'ektov zheleznodorozhnoi terminal'no-skladskoi infrastruktury [Classification of objects of railway terminal and logistics infrastructure]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia [Ural State University of Railway Transport Bulletin]*, 2017, no. 1 (33), pp. 70–83. (In Russian)
26. Pokrovskaya O. D. Chi terminelistica reale come una nuova direzione scientific. *Italian Science Review*, 2016, vol. 1 (34), pp. 112–116.
27. Kozlov P. A., Permikin V. Iu. & Kashcheeva N. V. K teorii transportnykh uzlov [Contribution to the theory of transport hubs]. *Transport Urala [Urals Transport]*, 2013, no. 4 (39), pp. 3–5. (In Russian)
28. Mikoni S. V. *Mnogokriterial'nyi vybor na konechnom mnozhestve al'ternativ [Multi-criteria choice in finite set of alternatives]*. Saint Petersburg, Lan' Publ., 2009, 156 p. (In Russian)
29. Ventsel' E. S. *Issledovanie operatsii. Zadachi, printsipy, metodologiya [Operations research. Tasks, principles, methodology]*. Moscow, Drofa Publ., 2004, 208 p. (In Russian)
30. Samuilov V. M., Pokrovskaya O. D. & Voskresenskaia T. P. Integratsiia regional'noi terminal'no-logisticheskoi seti v mezhdunarodnye transportnye koridory [Integration of a regional terminal and logistics network into international transport corridors]. *Innovatsionnyi transport [Innovative transport]*, 2013, no. 1 (7), pp. 33–37. (In Russian)
31. Voskresenskaia T. P. & Pokrovskaya O. D. Metodika i algoritimizatsiia priniatiia reshenii po formirovaniu terminal'noi seti v regione [Methods and algorithm development for decision-making in forming regional terminal network]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia [Ural State University of Railway Transport Bulletin]*, 2010, no. 3 (7), pp. 74–84. (In Russian)
32. Kotliarenko A. F. & Kurenkov P. V. Vzaimodeistvie na transportnykh stykakh pri vneshnetorgovykh perevozkakh [Interaction at transport junctions in foreign trade transportation]. *Zheleznodoroznyi transport [Railway transport]*, 2002, no. 2, pp. 48–52. (In Russian)
33. Kurenkov P. V. & Kotliarenko A. F. Vzaimodeistvie gruzovladel'tsa s prichastnymi podrazdeleniiami pri eksportno-importnykh zheleznodorozhnykh perevozkakh cherez morskii porty [Interaction of cargo owner with concerned units in export-import railway transportation through sea ports]. *Biulleten' transportnoi informatsii [Transport information bulletin]*, 1997, no. 6, pp. 34–38. (In Russian)
34. Kurenkov P. V. Logisticheskii podkhod k upravleniiu gruzopotokami [Logistical approach to management of cargo flows]. *Zheleznodoroznyi transport [Railway transport]*, 1997, no. 3, pp. 13–15. (In Russian)
35. Stetsenko V. V. & Kurenkov P. V. Kommercheskoe vzaimodeistvie transportnykh sistem [Commercial interaction of transport systems]. *Zheleznodoroznyi transport [Railway transport]*, 1998, no. 10, pp. 31–36. (In Russian)
36. Pokrovskaya O. D. & Malikov O. B. Metodika postroeniia setevogo grafa struktury logisticheskogo ob'ekta [Method for designing network graph of a logistical object]. *Mir transporta [World of transport]*, 2017, vol. 25, no. 1, pp. 18–27. (In Russian)
37. Pokrovskaya O. D. & Malikov O. B. Analiz sistemy normirovaniia na zheleznodorozhnom transporte s pozitsii logistiki i klientoorientirovannosti [Analysis of norm setting system in railway transport from the viewpoint of logistics and client focus]. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia [Proceedings of Petersburg State Transport University]*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2017, iss. 2 (51), pp. 187–199. (In Russian)
38. Titova T. S. & Akhtiamov R. G. *Sistema upravleniia tekhnosfernoi bezopasnost'iu [Technogenic safety management system]*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2017, 23 p. (In Russian)
39. Titova T. S. Metodologiya kompleksnoi otsenki vliianiia novykh tekhnologii na geoekologicheskuiu obstanovku [Methodology for integrated assessment of the influence of new technologies on geo-ecological condition]. *Vestnik Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo institute zheleznodorozhnogo transporta [All-Russian Railway Research Institute Herald]*, 2005, no. 5, pp. 2–5. (In Russian)
40. Titova T. S., Shashurin A. E. & Boiko Yu. S. Tekhnicheskie resheniia po snizheniiu shuma or vysoko-

skorostnykh zheleznodorozhnykh magistrali [Technical solutions for reducing noise from high-speed rail mainlines]. *Transport Rossiiskoi Federatsii* [Transport of the Russian Federation], 2015, no. 2 (57), pp. 30–35. (In Russian)

41. Titova T. S., Akhtiamov R. G. & Elizar'ev A. N., Elizar'eva E. N. *Podkhody k obespecheniiu tekhnosfernoi i ekologicheskoi bezopasnosti ob'ektov transporta* [Approaches to ensuring technogenic and environmental safety of transport objects]. Ufa, Ufimskii gosudarstvennyi aviazionnyi tekhnicheskii universitet Publ., 2017, 72 p. (In Russian)

42. Titova T. S. & Stepanova A. A. *Ekologicheskie problemy transportnogo stroitel'stva* [Environmental problems in transport construction]. *Tekhnosfernaia i ekologicheskaiia bezopasnost' na transporte (TEBTRANS–2014)* [Technogenic and environmental safety in transport (TEBTRANS–2014)]. Materialy IV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Materials of the 4th International research and practice conference]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2014, pp. 202–204. (In Russian)

43. Safronova A. A. & Kharimanova D. G. *Povyshenie ekologicheskoi bezopasnosti na osnove sistemy ekologicheskogo menedzhmenta (SEM)* [Increasing environmental safety on the basis of environmental management system]. *Innovatsionnaia ekonomika i sovremennyi menedzhment* [Innovative economy and

modern management], 2017, no. 2 (13), pp. 36–40. (In Russian)

44. Safronova A. A. & Ataev A. M. *Upravlenie riskami investitsionnogo proekta* [Risk management in investment project]. *Innovatsionnaia ekonomika: informatsiia, analitika, prognozy* [Innovative economy: information, analytics, forecasts], 2012, no. 1–2, pp. 3–9. (In Russian)

45. Egorov A. Yu. & Safronova A. A. *Metologicheskii podhod k optimizatsii upravleniya potokovimi protsessami* [Systematical approach to optimization management torrenting processes]. *Innovatsionnaia ekonomika: informatsiia, analitika, prognozy* [Innovative economy: information, analytics, forecasts], 2012, no. 1–2, pp. 70–73. (In Russian)

46. Safronova A. A. *Innovatsii kak osnova tsiklicheskogo razvitiia ekonomiki* [Innovations as a basis of cyclical development of the economy]. *Evraziiskii soiuz uchenykh* [Eurasian union of researchers], 2015, no. 10–5 (19), pp. 153–155. (In Russian)

Received: August 21, 2019

Accepted: August 30, 2019

Authors information:

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

Tamila S. TITOVA – D. Sci. in Engineering, Professor; titova@pgups.ru



УДК 656.212.5.073

Особенности определения пропускной способности двухпутных участков

Ж. Я. Абдуллаев

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

Для цитирования: *Абдуллаев Ж. Я.* Особенности определения пропускной способности двухпутных участков // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 3. – С. 361–371. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-361-371

Аннотация

Цель: Представить проблемы применения для узбекских железных дорог российской методики расчета наличной пропускной способности и дать предложения по ее адаптации к условиям Узбекистана. **Методы:** Использован метод сравнительного анализа. **Результаты:** Приведены основные факторы, влияющие на пропускную способность линий, преимущества и недостатки по каждому существующему методу определения пропускной способности железнодорожных линий. Показано, что использование графоаналитических методов позволяет учитывать многие факторы, влияющие на пропускную способность железнодорожных линий, а также предложены новые формулы для расчета наличной пропускной способности на двухпутных участках. **Практическая значимость:** Применение предлагаемой методики дает возможность определить максимальное число поездов при непараллельном графике движения, а также оценить результаты организации смешанного движения.

Ключевые слова: Смешанное движение, пропускная и провозная способности, межпоездной интервал, коэффициент съема, масса и длина поезда.

Введение

Техническая возможность железных дорог по обеспечению перевозок пассажиров и грузов определяется пропускной способностью основных устройств и сооружений [1]. Эта характеристика позволяет определить возможность освоения существующих и перспективных объемов перевозок при различных

сценариях развития экономики Узбекистана. При недостаточном развитии транспортной инфраструктуры на железнодорожной линии организовывается смешанное движение поездов, представляющее пропуск скоростных, высокоскоростных пассажирских и грузовых поездов по одним путям. Такая организация является наиболее распространенной в мире, но и наиболее сложной. Поэтому технологи-

ческим вопросам эксплуатации железнодорожных участков со смешанным движением уделяется особое внимание.

Обзор и анализ методов определения пропускной способности линии

Пропускная способность существенно зависит от многих факторов: нормы массы и длины поездов, ходовой скорости, межпоездного интервала, типа графика и др. Учет этих факторов оказывает существенное влияние на повышение качества перевозок, которое зависит также от способов организации смешанного движения поездов, выполнения работ по текущему содержанию и ремонту пути [1].

В настоящее время существуют три основных метода для расчета пропускной способности линии с учетом указанных факторов: аналитический, графоаналитический и имитационное моделирование [2–5]. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки.

Аналитический метод обладает свойством универсальности проводимых вычислений пропускной способности при различных условиях. Однако формальный подход к определению коэффициента съема является крупным недостатком данного метода.

По действующим методикам [6] наличная пропускная способность железнодорожного участка по перегонам находится с учетом исключения для движения поездов части суточного бюджета ($t_{\text{тех}}$), необходимого для выполнения работ по содержанию технических устройств и плановых видов ремонта устройств, а также компенсации потерь, вызванных отказами в работе технических средств по формуле

$$N_{\text{нал}} = \frac{(1440 - t_{\text{тех}})}{I_{\text{гр}}} \cdot \alpha_{\text{н}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{тех}}$ – бюджет времени на содержание и ремонт инфраструктуры; $I_{\text{гр}}$ – расчетный межпоездной интервал в соответствии с [7]; $\alpha_{\text{н}}$ – коэффициент надежности работы инфраструктуры и подвижного состава.

По [8] для расчета максимально возможного числа грузовых поездов, которое может быть пропущено по участку в сутки при непараллельном графике движения, рекомендуется следующее аналитическое выражение:

$$N_{\text{max}}^{\text{гр}} = N_{\text{нал}} - N_{\text{ск}}^{\text{пас}} \cdot \epsilon_{\text{ск}}^{\text{пас}} - N^{\text{пас}} \cdot \epsilon^{\text{пас}} - N_{\text{пр}}^{\text{пас}} \cdot \epsilon_{\text{пр}}^{\text{пас}} - N_{\text{ус}} \cdot \epsilon_{\text{ус}} - N^{\text{сб}} \cdot \epsilon^{\text{сб}}, \quad (2)$$

в котором $N_{\text{ск}}^{\text{пас}}, N^{\text{пас}}, N_{\text{пр}}^{\text{пас}}, N_{\text{ус}}, N^{\text{сб}}$ – число соответственно скоростных, обычных пассажирских, пригородных, ускоренных грузовых и сборных поездов или пар поездов; $\epsilon_{\text{ск}}^{\text{пас}}, \epsilon_{\text{пр}}^{\text{пас}}, \epsilon_{\text{ус}}, \epsilon^{\text{сб}}$ – коэффициент съема грузовых поездов скоростными, обычными пассажирскими, пригородными, ускоренными грузовыми и сборными поездами.

В настоящей работе рекомендуется формула [9] расчета максимального числа грузовых поездов при непараллельном графике движения:

$$N_{\text{max}}^{\text{гр}} = N_{\text{нал}} \cdot k - N_{\text{выск}}^{\text{пас}} \cdot \epsilon_{\text{выск}}^{\text{пас}} - N_{\text{ск}}^{\text{пас}} \cdot \epsilon_{\text{ск}}^{\text{пас}} - N^{\text{пас}} \cdot \epsilon^{\text{пас}} - N_{\text{пр}}^{\text{пас}} \cdot \epsilon_{\text{пр}}^{\text{пас}} - N_{\text{ус}} \cdot \epsilon_{\text{ус}} - N^{\text{сб}} \cdot \epsilon^{\text{сб}}, \quad (3)$$

здесь k – коэффициент заполнения пропускной способности, $k = 0,99$ [9]; $N_{\text{выск}}^{\text{пас}}$ – число высокоскоростных пассажирских поездов, соответственно поезд или пара поездов; $\epsilon_{\text{выск}}^{\text{пас}}$ – коэффициент съема грузовых поездов высокоскоростными.

Вместе с тем в формулах (1)–(3) не учтено влияние таких элементов пропускной способности, в зависимости от интервала одновременного отправления и встречного прибытия поездов при враждебных маршрутах в случаях не должно быть встреч скоростных и грузовых поездов на двухпутных перегонах. Оно описывается [10] так:

$$\epsilon_{\text{пас}}^{\text{выс}} = m_{\text{р}} - m_0 + 0,5, \quad (4)$$

где $m_{\text{р}}$ – расчетное количество обгонов грузовых поездов пассажирскими:

$$m_p = \frac{T_{гр}(1 - \Delta)}{I_{гр}} + 1;$$

m_o – фактическое количество обгонов грузовых поездов на участке; $T_{гр}$ – время хода грузового поезда на участках; Δ – соотношение скоростей движения пассажирских и грузовых поездов.

Графоаналитический метод используется специалистами при составлении исполненного и нормативного графиков движения, учитывая среднюю часовую возможность технических станций по приему и отправлению поездов, количество и полезную длину путей, расположение парков, платформ и других элементов, обуславливающих пересечение маршрутов (при аналитическом также) [11]. Однако имитационное моделирование работы технических станций в комплексе с примыкающими перегонами, пропускающими потоки поездов с учетом их взаимных задержек, не позволяет выполнить анализ результирующей пропускной способности в зависимости от различных организационных мероприятий. Тем не менее нормативные графики движения позволяют точнее, чем по инструкции, подсчитать количество поездов всех категорий, которое планируется пропустить по железнодорожной линии за сутки. Но и такой способ не дает возможности определить реально достижимую пропускную способность по следующим причинам.

В соответствии с действующей методикой прокладываются линии хода скоростных пассажирских поездов, затем нитки обычных пассажирских, пригородных и сборных поездов. Далее оставшееся после выделения технологического окна пространство графика равномерно заполняется линиями хода одного расчетного грузового поезда, перегонные времена хода которого определены ограничениями скорости. При этом требуется проложить на графике заданное количество линий хода расчетных грузовых поездов. Потому смешанная прокладка на графике линий хода смешанных поездов различных категорий не получила широкого распространения, так как это требует увеличения количества и полезной длины

станционных путей для формирования данных поездов, а также усложняет организации перевозок. В таких условиях возможность пропуска каждого грузового поезда по очередной нитке графика вынужден определять поездной диспетчер (ДНЦ). При этом грузовой поезд, перегонное время хода которого больше расчетного, в условиях выдачи предупреждения о снижении установленной скорости, может задержать пассажирский поезд и при близком расположении их ниток на графике по такой нитке не пропускается.

Таким образом, промежуток времени между пассажирскими поездами может оказаться не использованным для пропуска грузового поезда и тогда фактическая пропускная способность получается менее определяемой по нормативному графику.

Метод имитационного моделирования заключается в многократном моделировании движения потока поездов всех категорий, следующих по перегонам и станциям железнодорожного направления, протяженность которого равна расстоянию от станции формирования до станции назначения. Он не требует определять расчетный участок и делить его при наличии на нем станции с примыканием более двух направлений, поскольку результирующая пропускная способность автоматически оценивается количеством поездов, пропущенных по всему направлению. К недостаткам этого метода можно отнести сложность как разработки его инструментов, их отладки верификации, так и использования его для получения результатов.

Вопросами развития методики расчета пропускной способности на двухпутных участках занимались многие ученые [12–14], при этом ими был применен различный набор параметров.

Так, Ф. П. Кочнев [15] отмечает, что при непараллельном графике точно определить влияние факторов движения пассажирских поездов нельзя, пропускную способность возможно установить лишь после построения максимального графика движения поездов. Из [15] следует, что аналитически мож-

но дать лишь приближенную оценку влияния факторов движения пассажирских поездов на пропускную способность, а также выявить изменения анализируемых факторов.

В [16] доказано, что оценка эффективных способов организации поездов смешанного движения должна производиться, безусловно, при учете пропускной способности и инфраструктурных особенностей перегонов железных дорог. Поэтому в зависимости от способа организации смешанного движения будет различным максимальное число пропусков грузовых поездов по ограничивающему перегону. Недостаток такого способа определяется из условия, что число поездов остальных категорий является фиксированным.

Постановка задачи исследования

В настоящее время не существует общепринятых формальных математических (аналитических) формул для оценки пропускной способности на действующих (модернизированных) двухпутных перегонах со смешанным движением, в этих случаях не должно быть встреч скоростных пассажирских поездов с грузовыми поездами. Для определения пропускной способности на двухпутных линиях потребовалось решить следующую задачу: разработать математический метод для расчета пропускной способности двухпутных линий при организации поездов смешанного движения.

Оценка пропускной способности на двухпутных участках

Теоретический и практический опыт эксплуатации железных дорог свидетельствует о том, что при повышении скорости пассажирских поездов происходит снятие из графика движения других категорий поездов.

В этой связи необходимо обеспечить безопасность движения поездов при разработке графика их движения на участке. В таком

случае следует соблюдать особые условия на участках направлений. Это происходит при следующих условиях: для выполнения по текущему содержанию и ремонту пути, СЦБ и связи в графике обязательно предполагаются ежесуточные «окна» продолжительностью до 4 ч; перед высокоскоростным поездом должны быть свободны целые два перегона [17]. Соблюдение вышеуказанных условий, наряду с обеспечением безопасности движения поездов, приводит к сокращению пропускной способности железнодорожных линий со смешанным движением. Например, один высокоскоростной пассажирский поезд при смешанном движении снимает от 6 до 8 поездов [17]. Учитывая вышеизложенное, при развитии высокоскоростного движения в Российской Федерации построены дополнительные линии, например, на направлении «Санкт-Петербург–Бусловская» введен в эксплуатацию обходной путь «Лосево–Каменногорск» для выноса грузового движения со скоростного участка.

В Узбекистане смешанное движение (скоростное и высокоскоростное) организуется с использованием модернизированных линий. В существующих условиях необходимо учитывать пропускную способность двухпутных участков. По перегонам с достаточной пропускной способностью производится смешанное движение всех категорий поездов с учетом действующей инфраструктуры.

На рис. 1 представлен графоаналитический метод расчета наличной пропускной способности двухпутного железнодорожного участка.

Встреча скоростных пассажирских и грузовых поездов будет иметь место в случаях, когда линии хода первых попадут на станцию *б*. Данная (встречная) зона начинается через минуту после отправления с технической станции *А* грузового поезда *2019* (прибывающим на техническую станцию *Д* с обеспечением расчетной величины интервала одновременного прибытия) и заканчивается в момент отправления с технической станции *А* грузового поезда *2001*, который должен быть остановлен для встречи его с грузовым на ближайшем к раздельному пункту *б*. Такое утверждение

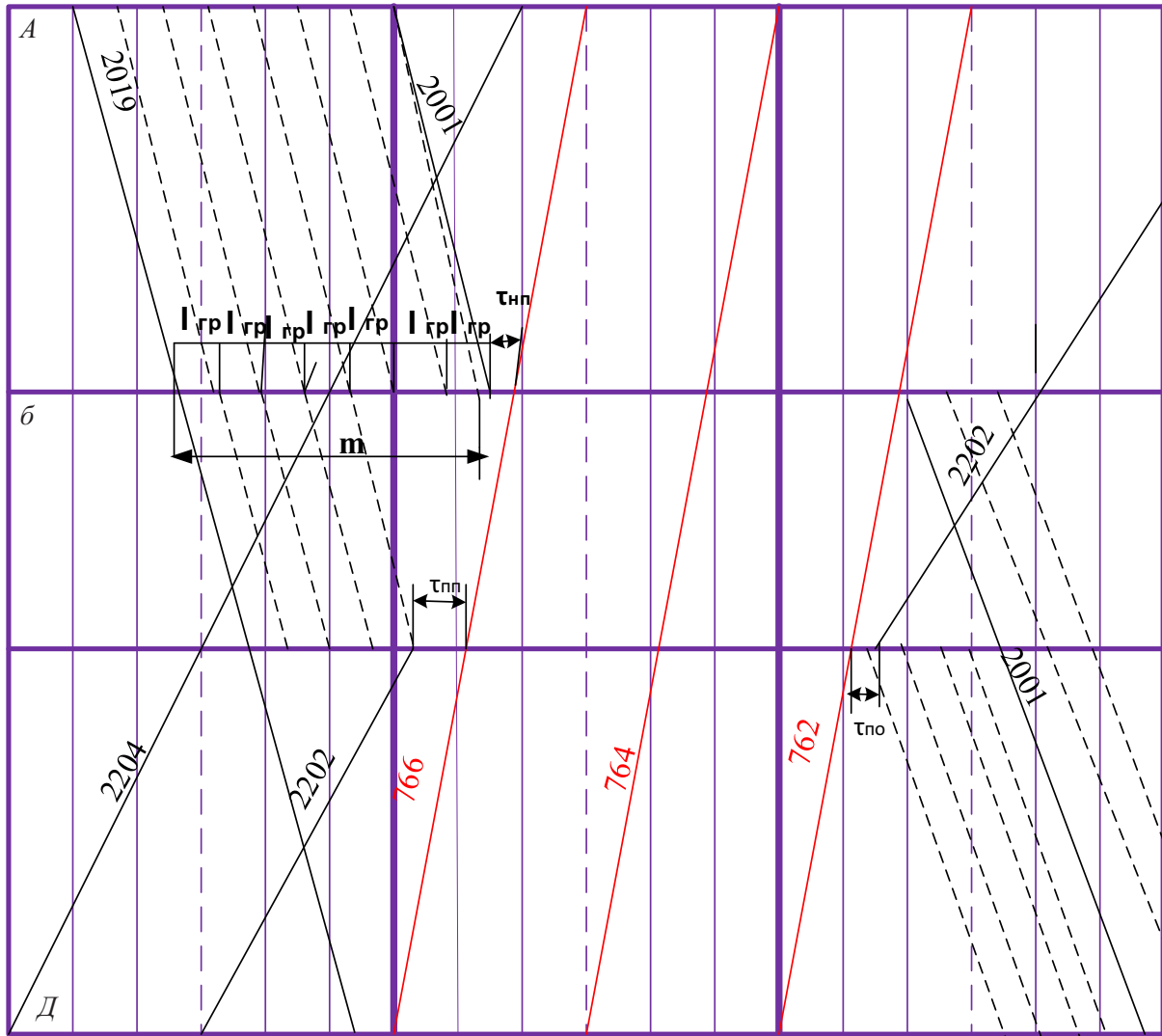


Рис. 1. Фрагмент графика движения поездов

обусловлено строгим следованием по нитке пассажирского поезда T_3 .

Если грузовой поезд 2001 отправить на 1 мин позже варианта, представленного на рис. 1, то по станции Д величина интервала попутного прибытия высокоскоростного пассажирского поезда за грузовым не позволяет пропустить скоростной пассажирский поезд из-за задержки на последнем раздельном пункте грузового поезда 2001. Аналогичное положение имеет место и в случае с отправлением грузового поезда 2019. Если его отправить на 1 мин позже варианта, представленного на рис. 1 (зона 2), то на первом раздельном пункте железнодорожного участка (промежуточной

станции) не может быть обеспечена величина одновременного прибытия высокоскоростного пассажирского поезда, идущим вслед грузовому. Следовательно, грузовой поезд 2019 должен быть задержан на технической станции А, отправлен на участок после пассажирского поезда и не будет соблюден интервал одновременного прибытия.

В общем случае величина T_3 равна

$$T_3 = m - 1, \tag{5}$$

здесь m – период между последовательным отправлением на железнодорожный участок грузовых поездов 2019 и 2001 (мин).

Из рис. 1 следует, что

$$m = t_{гр}^m - t_{гр}^{m1}, \quad (6)$$

где $t_{гр}^m$, $t_{гр}^{m1}$ – время следования и время хода по первому перегону железнодорожного участка.

С учетом формулы (5) выражение (6) можно записать следующим образом:

$$T_3 = t_{гр}^m - t_{гр}^{m1} - 1. \quad (7)$$

Рассчитаем среднее время нахождения грузового поезда под интервал неодновременного прибытия и встречного отправления поездов при враждебных маршрутах. Поезд 2001 будет задержан на раздельном пункте b , если по раздельному пункту A не будет соблюдаться интервал неодновременного прибытия пассажирского поезда за грузовым. Если же интервал неодновременного прибытия составит $\tau_{пп}$, то грузовой поезд 2001 будет поставлен под скрещением на раздельном пункте b . Второе положение нитки пассажирского поезда приведет к максимальной по своей продолжительности задержке грузового поезда под интервал неодновременного отправления и встречного прибытия поездов при враждебных маршрутах на раздельном пункте b . Минимальная же задержка на раздельном пункте b будет иметь место при первом положении нитки пассажирского поезда, когда по раздельному пункту b будет строго соблюден интервал встречного прибытия поездов при враждебных маршрутах $\tau_{пп}$.

Из этого следует, что время встречного прибытия и отправления грузового поезда на первом (от технической станции) раздельном пункте составляет

$$T_3^1 = t_{гр}^m - t_{гр}^{m1} - 1 + I_{выс}^{пас} \cdot (3-1) + t_{пз} + t_3 + \tau_{н}^{пп} + \tau_{ск}, \quad (8)$$

где $I_{выс}^{пас}$ – межпоездной интервал высокоскоростного поезда;

на втором раздельном пункте

$$T_3^2 = t_{гр}^m - t_{гр}^{m2} - 1 + I_{выс}^{пас} \cdot (3-1) + t_{пз} + t_3 + \tau_{н}^{пп} + \tau_{ск}; \quad (9)$$

на третьем (перед второй технической станцией) раздельном пункте

$$T_3^3 = t_{гр}^m - t_{гр}^{m3} - 1 + I_{выс}^{пас} \cdot (3-1) + t_{пз} + t_3 + \tau_{н}^{пп} + \tau_{ск}; \quad (10)$$

на последнем (перед второй технической станцией) раздельном пункте

$$T_3^k = t_{гр}^m - t_{гр}^{mk} - 1 + I_{выс}^{пас} \cdot (3-1) + t_{пз} + t_3 + \tau_{н}^{пп} + \tau_{ск}, \quad (11)$$

здесь $t_{гр}^{m2}$, $t_{гр}^{m3}$, $t_{гр}^{mk}$ – время хода грузового поезда соответственно по 2, 3, ..., k перегонам железнодорожного участка, мин; k – количество перегонов на рассматриваемом железнодорожном участке.

Тогда среднее время задержки грузового поезда скрещением его с высокоскоростным пассажирским поездом для всего участка определяется следующим выражением:

$$T_3^x = \frac{T_3^{x1} + T_3^{x2} + T_3^{x3} + \dots + T_3^{xk}}{k-1} = \frac{t_{гр}^m - t_{гр}^{mx1} + t_{гр}^m - t_{гр}^{mx2} + t_{гр}^m - t_{гр}^{mx3} + \dots + t_{гр}^m - t_{гр}^{mxk} - (k-1) + (k-1) \times I_{выс}^{пас} \cdot (3-1) + (k-1) \cdot (t_{пз} + t_3)}{k-1}. \quad (12)$$

Потому формулу (12) следует записать так:

$$T_3^x = \frac{t_{гр}^m - t_{гр}^{mx1} + t_{гр}^m - t_{гр}^{mx2} + \dots + t_{гр}^m - t_{гр}^{mxk}}{k-1} - 1 + I_{выс}^{пас} \cdot (n_{выс} - 1) + t_{пз} + t_3 + \tau_{н}^{пп} + \tau_{ск}. \quad (13)$$

Согласно графику движения поездов и п. 2.28 нормативного документа [8], на двухпутных перегонах не должно быть встреч скоростных пассажирских и грузовых поездов (см. (13)).

Основываясь на вышеперечисленном, выполненное исследование при разработке методики для расчета пропускной способности на двухпутных участках со смешанным движением показало, что она зависит от размеров скоростного пассажирского поезда и интервалов между высокоскоростными поездами, а следовательно, встречного прибытия поездов при враждебном маршруте с грузовыми поездами и межпоездных интервалов грузовых поездов. Для расчета наличной пропускной способности на двухпутных участках воспользуемся такой формулой:

$$N_{\text{нал}} = \frac{(1440 - t_{\text{тех}} - \frac{t_{\text{гр}}^m - t_{\text{гр}}^{mx} - 1}{k - 1} + \tau_{\text{н}}^{\text{пр}} + \tau_{\text{ск}} + t_{\text{рз}} + t_3 + (n_{\text{вск}} - 1) \cdot I_{\text{вск}})}{I_{\text{гр}}} \cdot \alpha_{\text{н}}, \quad (14)$$

где $n_{\text{вск}}$ – количество высокоскоростных поездов; $I_{\text{вск}}$ – межпоездные интервалы высокоскоростных пассажирских поездов в пакете.

На рис. 2 представлена результирующая расчетная пропускная способность двухпутного железнодорожного участка, полученная

по существующей Инструкции по наличной пропускной способности (ИПС) и предлагаемой методике. Установлено, что определять пропускную способность по формулам для непараллельного графика целесообразно, начиная с определенного соотношения движения грузовых и пассажирских поездов (с 20 пассажирских, в том числе 3 высокоскоростных пассажирских поездов). При меньшем соотношении числа поездов пропускную способность следует считать, как для параллельного графика, поскольку пассажирские поезда возможно проложить таким образом, чтобы они не мешали грузовому движению.

Сравнительный анализ показал, что результаты расчетов пропускной способности по действующей ИПС и по предлагаемому методу в среднем отклоняются на 4,78%.

Применение методики ИПС и предлагаемой позволяет провести анализ наличной пропускной способности, вскрывать имеющиеся резервы и выявлять узкие места с дефицитом пропускной способности.

Заключение

Существующие методики определения наличной пропускной способности не учитывают ряд факторов:

- массу и длину грузовых поездов различной категории;
- интервал одновременного прибытия и отправления поездов на станцию.

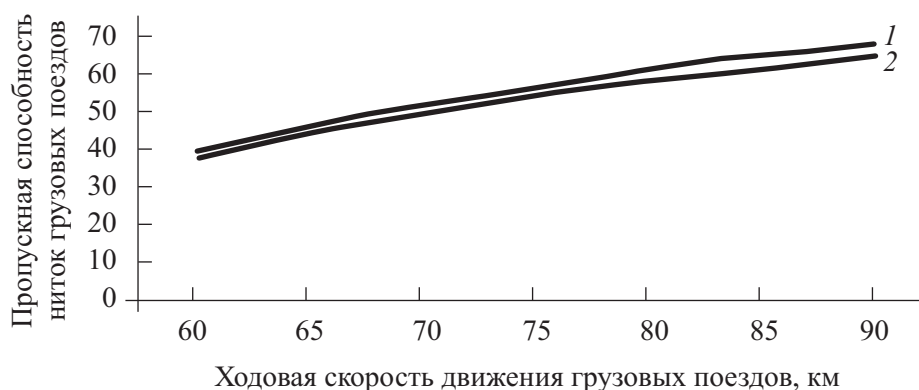


Рис. 2. Зависимости пропускной способности участка от скорости движения грузовых поездов: 1 – действующие по методике ИПС; 2 – по предлагаемой методике

Использование графоаналитического метода при условии адекватного отражения вышеперечисленных факторов дает возможность определить пропускную способность линии довольно точно. Однако для предварительной оценки необходимо иметь аналитические зависимости.

В предложенных выражениях (1)–(14), основанных на графоаналитическом методе расчета наличной пропускной способности железнодорожных линий, принимаются во внимание все особенности путевого развития и технологии работы станций.

Библиографический список

1. Инструкция по расчету наличной пропускной способности. – Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 16.11.2010 г. № 128. – М. : ОАО «РЖД», 2011. – 305 с.
2. Левин Д. Ю. Расчет и использование пропускной способности железных дорог / Д. Ю. Левин, В. Л. Павлов. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2011. – 364 с.
3. Абрамов А. А. Имитационное моделирование наличной пропускной способности / А. А. Абрамов, К. В. Андросюк // Железнодорожный транспорт. – 2013. – № 11. – С. 28–31.
4. Анисимов В. А. Концепция повышения допускаемых скоростей движения поездов в рамках полигонных технологий / В. А. Анисимов, А. Т. Осминин, В. В. Анисимов // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 3. – С. 19–27.
5. Угрюмов А. К. Вопросы организации движения на двухпутных участках / А. К. Угрюмов // Вопросы эксплуатации железных дорог СССР : Труды ЛИИЖТ. – Л. : Трансжелдориздат, 1960. – Вып. 170. – С. 34–63.
6. Осминин А. Т. Проблемы и пути их научного решения в вопросах эксплуатации железных дорог / А. Т. Осминин // Бюл. Объед. Учен. совета ОАО «РЖД». – 2015. – № 4. – С. 41–54.
7. Инструкция по определению станционных и межпоездных интервалов. – Утв. вице-президентом ОАО «РЖД» А. А. Краснощеком 30.12.2011 г. № 2864р. – М. : ОАО «РЖД», 2011. – 213 с.
8. Грошев Г. М. Пропускная способность и график движения поездов на участках железной дороги : учеб. пособие / Г. М. Грошев, А. А. Грачев, А. С. Бессолицын, О. В. Котенко, Б. Е. Алексеев ; под ред. Г. М. Грошева. – СПб. : ПГУПС, 2016. – 53 с.
9. Климова Е. В. Методика оценки эффективности формирования и пропуска соединенных поездов на участках и полигонах железных дорог / Е. В. Климова // Вестн. Сибирск. гос. ун-та путей сообщения. – 2015. – № 4. – С. 19–23.
10. Грачев А. А. Вечные вопросы организации движения поездов на двухпутных участках / А. А. Грачев, В. Л. Белозеров // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2017. – Т. 14, вып. 3. – С. 397–405.
11. Кокурин И. М. Оценка пропускной способности железных дорог методом имитационного моделирования / И. М. Кокурин // Актуальные проблемы управления перевозочным процессом : сб. науч. трудов ; под ред. Ю. И. Ефименко. – СПб. : ПГУПС, 2009. – Вып. 8. – С. 18–28.
12. Макаровичкин А. М. Использование и развитие пропускной способности железных дорог / А. М. Макаровичкин, Ю. В. Дьяков. – М. : Транспорт, 1981. – 287 с.
13. Левин Д. Ю. Что необходимо для выполнения графика / Д. Ю. Левин, Э. А. Хейн, В. Н. Шмаль // Мир транспорта. – 2013. – № 1 (45). – С. 110–119.
14. Вернигора Г. В. Аналитический расчет коэффициентов съема грузовых поездов пассажирскими в условиях скоростного движения / Г. В. Вернигора, А. Ю. Папахов, Н. А. Логвинова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 2/3 (62). – С. 51–55.
15. Кочнев Ф. П. Управление эксплуатационной работой железных дорог / Ф. П. Кочнев, И. Б. Сотников. – М. : Транспорт, 1990. – 424 с.
16. Климова Е. В. Оценка экономической эффективности способов организации скоростного движения пассажирских поездов : автореф. дис. ... канд. техн. наук, специальность : 08.00.05 / Е. В. Климова. – Новосибирск : СГУПС, 2015. – 24 с.
17. Боровикова М. С. Организация высокоскоростного движения на железных дорогах Российской Федерации : учеб. пособие / М. С. Боровикова, А. В. Ширяев, О. И. Ваганова. – М. : ООО «Пиар Пресс», 2011. – 64 с.

18. Временная инструкция «О порядке обслуживания и организации пропуска высокоскоростных электропоездов “Afrosiyob” по железнодорожным путям общего пользования на участке Ташкент–Самарканд». – Ташкент : Узгосжелдорнадзор, 2011. – 36 с.

Дата поступления: 25.07.2019
Решение о публикации: 05.08.2019

Контактная информация:

АБДУЛЛАЕВ Жасурбек Якубович – аспирант;
zafarchik0901@mail.ru

Regularity of definition of train-handling capacity at double-track railroad sections

Zh. Ya. Abdullaev

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

For citation: Abdullaev Zh. Ya. Regularity of definition of train-handling capacity at double-track railroad sections. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 3, pp. 361–371. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-361-371 (In Russian)

Summary

Objective: To improve calculation procedure for the available train-handling capacity at double-track railroad sections in Uzbekistan with mixed train traffic. **Methods:** The method of comparative analysis was used. **Results:** The key factors influencing train-carrying capacity of sections were given. The advantages and drawbacks of each method for determining train-carrying capacity at double-track railway sections were demonstrated. Application of graphical analytic methods makes it possible to take into account most factors of train-handling capacity at railroad sections. New formulas for calculation of the available train-handling capacity at double-track railroad sections were introduced in the study. **Practical importance:** Application of the method in question allows for determining the maximum number of trains handled in case of non-parallel train schedule, as well as estimating top results of mixed train traffic management.

Keywords: Mixed traffic, train-handling and carrying capacity, train-to-train interval, group of trains coefficient, train load and length.

References

1. *Instruktsiya po raschetu nalichnoy propusknoy sposobnosti zheleznnykh dorog [Circular on train-handling capacity calculation]*. Approved by OAO “Russian Railways” order dated November 16, 2010, no. 128. Moscow, OAO “Russian Railways” Publ., 2011, 305 p. (In Russian)

2. Levin D. Yu., Pavlov V. L. *Raschet i ispolzovaniye propusknoy sposobnosti zheleznnykh dorog [Calculation and application of train-handling capacity]*.

Moscow, Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte [Training and methodology center for railway transport] Publ., 2011, 364 p. (In Russian)

3. Abramov A. A. Imitatsionnoye modelirovaniye nalichnoy propusknoy sposobnosti [Simulation modeling of the available train-handling capacity]. *Zheleznodorozhniy transport [Railroad transport]*, 2013, no. 11, pp. 28–31. (In Russian)

4. Anisimov V. A., Osminin A. T. & Anisimov V. V. *Kontseptsiya povysheniya dopuskaemykh skorostey*

dvizheniya poezdov v ramkakh poligonnykh tekhnologiy [The concept of train permissible speed increase within the framework of field technologies]. *Zheleznodorozhniy transport [Railroad transport]*, 2017, no. 3, pp. 19–27. (In Russian)

5. Ugryumov A. K. Voprosy organizatsii dvizheniya na dvukhputnykh uchastkekh [Issues of traffic management at double-track railroads]. *Voprosy ekspluatatsii zheleznykh dorog SSSR [Issues of railway operation in USSR]*. *Trudy LIIZhTa [Proceedings of LIIZhT [Leningrad State Transport University]*. Leningrad, Transzheldorizdat Publ., 1960, iss. 170, pp. 34–63. (In Russian)

6. Osminin A. T. Problemy i puty ikh nauchnogo resheniya v voprosakh ekspluatatsii zheleznykh dorog [Problems and scientific solutions regarding railway operation]. *Byulleten Obyedinennogo uchenogo sovetata OAO “RZhD” [Bulletin of OAO Russian Railways Joint academic council]*, 2015, no. 4, pp. 41–54. (In Russian)

7. *Instruktsiya po opredeleniyu stantsionnykh i mezhpoeznykh intervalov [Circular on determination of station and train-to-train intervals]*. Approved by Vice-president of OAO “Russian Railways” A. A. Krasnoshchekiy December 30, 2011, no. 2864r. Moscow, OAO “Russian Railways” Publ., 2011, 213 p. (In Russian)

8. Groshev G. M., Grachev A. A., Bessolitsyn A. S., Kotenko O. V. & Alekseev B. E. *Propusknaya sposobnost i grafik dvizheniya poezdov na uchastkakh zheleznoy dorogoy*. Ucheb. posobiye [Train-handling capacity and train schedule at railroad sections. Learning aid]. Ed. by G. M. Groshev. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2016, 53 p. (In Russian)

9. Klimova E. V. Metodika otsenki effektivnosti formirovaniya i propuska soyedinennykh poezdov na uchastkakh i poligonakh zheleznykh dorog [Methods for efficiency evaluation of composition and admission of united trains at railroad sections and polygons]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya [Proceedings of the Siberian Transport University]*, 2015, no. 4, pp. 19–23. (In Russian)

10. Grachev A. A. & Belozarov V. L. Vechniye voprosy organizatsii dvizheniya poezdov na dvukhputnykh uchastkakh [Eternal issues of train traffic operation at double-track railroad sections]. *Izvestiia PGUPS [Proceedings of Petersburg State Transport University]*.

Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2017, vol. 14, iss. 3, pp. 397–405. (In Russian)

11. Kokurin I. M. Otsenka propusknoy sposobnosti zheleznykh dorog metodom imitazionnogo modelirovaniya [The assesment of train-handling capacity for method modelirovaniya imitation]. *Aktualnie problemy upravleniya perevozochnim protsessam [Actual problems of management transport’s processes]*. Ed. by Yu. I. Efimenko. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2009, iss. 8, pp. 18–28. (In Russian)

12. Makarochkin A. M., Dyakov Yu. V. *Ispolzovaniye i razvitiye propusknoy sposobnosti zheleznykh dorog [Train-handling capacity: application and development]*. Moscow, Transport Publ., 1981, 287 p. (In Russian)

13. Levin D. Yu., Xein E. A. & Shmal’ V. N. Chto neobhodimo dlia vipolneniya grafika [What it is necessary for fulfilment of graph]. *Mir transporta [World of transport]*, 2013, no. 1 (45), pp. 110–119. (In Russian)

14. Vernigora G. V., Papakhov A. Yu. & Logvinova N. A. Analiticheskiy raschet koeffitsientov syema gruzovykh poezdov passazhirskimy v usloviyakh skorostnogo dvizheniya [The removal of freight trains by passenger trains during high-speed operation: analytical calculation of coefficients]. *Vostochno-Evropeiskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy [East-European journal of high technologies]*, 2013, no. 2/3 (62), pp. 51–55. (In Russian)

15. Kochnev F. P. & Sotnikov I. B. *Upravleniye ekspluatatsionnoy rabotoy zheleznykh dorog [Railroad field operation management]*. Moscow, Transport Publ., 1990, 424 p. (In Russian)

16. Klimova E. V. *Otsenka ekonomicheskoy effektivnosti sposobov organizatsii skorostnogo dvizheniya passazhirskikh poezdov [Economic efficiency assessment of high-speed traffic arrangement methods for passenger trains]*. Extended abstract of Cand. Eng. Sci. Diss., speciality: 08.00.05. Novosibirsk, SGUPS [Siberian Transport University] Publ., 2015, 24 p. (In Russian)

17. Borovnikova M. S., Shiryaev A. V. & Vaganova O. I. *Organizatsiya vysokoskorostnogo dvizheniya na zheleznykh dorogakh Rossiyskoy Federatsii [High-speed railway traffic arrangement in the Russian Fe-*

deration]. Teaching aid. Moscow, OOO “Piar Press” Publ., 2011, 64 p. (In Russian)

18. *Vremennaya instruktsiya “O poryadke obsluzhivaniya i organizatsii propuska vysokoskorostnykh elektropoezdov “Afrosiyob” po zheleznodorozhnym putyam obshchego polzovaniya na uchastke Tashkent–Samarkand”* [Circular “On maintenance and arrangement procedure of “Afrosiyob” high-speed electric trains admission at Tashkent–Samarkand” section of

non-public railways]. Tashkent, Uzgoszheldornadzor Publ., 2011, 36 p. (In Russian)

Received: July 25, 2019

Accepted: August 05, 2019

Author’s information:

Zhasurbek Ya. ABDULLAEV – Postgraduate Student; zafarchik0901@mail.ru

УДК 519.876.2:656.073.21

Моделирование планируемой погрузки по различным сценариям

И. Г. Белозерова

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

Для цитирования: Белозерова И. Г. Моделирование планируемой погрузки по различным сценариям // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 3. – С. 372–379. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-372-379

Аннотация

Цель: Разработка математических моделей для оценки влияния изменения таких временных показателей как период планирования перевозок грузов, период от регистрации до начала действия заявки формы ГУ-12, календарный день месяца (на который рассчитывается и планируется погрузка) – на планируемую погрузку вагонов (что и показывают различные сценарии). Оценка зависимости фактически погруженного количества вагонов от планируемого. **Методы:** При разработке математических моделей использовались статистические методы технологии Data Mining (метод наименьших квадратов, регрессионный анализ). **Результаты:** Представлены диаграммы рассеивания по разработанным моделям, графики наблюдаемых и расчетных значений, прогнозные модели зависимостей планируемой погрузки по дополнительным и плановым заявкам: от периода планирования перевозок грузов; периода от регистрации до начала действия заявки формы ГУ-12; календарного дня месяца, на который рассчитывается и планируется погрузка, и модель зависимости фактического числа погруженных вагонов от планируемого. Модели рассматриваются на примере портов и припортовых станций Дальневосточной железной дороги. **Практическая значимость:** По полученным прогнозным моделям можно оценить период планирования перевозок грузов при задании различных сценариев выполнения планирования перевозок грузов, при котором планируемая погрузка вагонов будет наиболее точно выполнена (что можно будет рассчитать в дальнейшем), тем самым повысив качество перевозочного процесса. Специалистам подразделений и предприятий, осуществляющих организацию перевозочного процесса, данные модели позволят прогнозировать планируемую и фактическую погрузку грузов на станции в зависимости от различных периодов планирования перевозок грузов, с учетом различных условий и ограничений, которые необходимо учитывать при планировании перевозочного процесса.

Ключевые слова: Планирование, математическая модель, планируемая погрузка, период планирования, система планирования, метод наименьших квадратов, план перевозок.

В Долгосрочной программе развития ОАО «РЖД» до 2025 года, утвержденной 19 марта 2019 г. № 466-р, одной из предусмотренных общекорпоративных задач является обеспечение перевозки предъявляемых грузов за счет развития комплексного обслуживания грузоотправителей и повышения качества грузовых перевозок.

Программа формируется с учетом результатов анализа деятельности ОАО «Российские железные дороги» («РЖД») на фоне ведущих зарубежных компаний-аналогов и конкурентов по основным видам деятельности, результатов анализов лучших российских и зарубежных практик, технологических аспектов, управленческих практик

и возможной оптимизации по следующим направлениям: совершенствование технологий и внедрение инноваций, в том числе за счет совершенствования нормативов содержания в рамках классификации железнодорожных линий, специализации грузовых и пассажирских ходов, внедрения новых технических средств и оборудования, совершенствования технологии перевозок, повышения эффективности малоинтенсивных линий и др.

Программа выполняется за счет изменений бизнес-процессов, технологий, внедрения новой техники и программного обеспечения, пересмотра внутренней и внешней нормативной базы, совместной работы с поставщиками и подрядчиками в области оптимизации закупок и сдерживания ценового давления [1].

ОАО «РЖД» работает в условиях непрерывного планирования, когда предусмотрена возможность подачи заявки на погрузку грузов в течение планируемого месяца. Это оказывает определенное негативное влияние на качество планирования вагонопотоков. Так, в сентябре 2018 г. при заявках грузоотправителей на перевозки в размере 2 млн 114 тыс. т в сутки план погрузки был принят в размере 3 млн 495 тыс. т в сутки. Прогнозная составляющая плана составила 40%, а по некоторым железным дорогам даже больше – от 64 до 80%.

Таким образом, предлагается повысить качество грузовых перевозок за счет большей точности планирования перевозок, с чем связаны сбалансированная работа всех структур, планирование тяги, выполнение ремонтных программ и в целом финансовый результат деятельности компании [2]. Это можно сделать, применив анализ, проведенный автором в [3, 4].

Планируемая погрузка зависит от заявленного грузоотправителями планируемого числа вагонов, поданных по плану, и изменений погрузки [5]. Кроме того, на основании анализа справок по реестрам, полученным из ЦФТО, было выявлено, что планируемая погрузка вагонов (расчет которой представлен в

реестрах) обусловлена заявленным объемом вагонов грузоотправителями, отклоненным и отказанным числом вагонов по срочным заявкам (т. е. по дополнительным реестрам, в срок позже, указанного в Уставе) [6].

В свою очередь, необходимо определить зависимость объема перевозок грузов от периода планирования и периода, за который подаются заявки грузоотправителями до начала планируемого периода.

Для расчета и нахождения зависимостей планируемой погрузки от периода планирования были собраны статистические данные по портам Дальневосточной железной дороги (ДВЖД) за месяц: заявки грузоотправителей (около 7000) на перевозку грузов на экспорт и информация, указанная в них, количество отклоненных и отказанных вагонов, количество погруженных вагонов по накладным – по каждой заявке.

Далее с помощью моделирования, обработав каждую заявку по ее продолжительности, было найдено количество вагонов, зарегистрированных по плану (по Уставу) и по дополнительным реестрам (срочные заявки), отклоненных и отказанных. Затем с учетом равномерного распределения погрузки за период от начала действия заявки до ее окончания получены среднесуточные значения по указанным выше показателям, разделив общее количество согласованного числа вагонов на количество дней, в которые действует данная заявка.

Спрогнозируем эти значения в зависимости от периода планирования погрузки и числа дней, за которые заявки будут считаться плановыми, а соответственно заявки, поданные позже, – дополнительными. По каждому прогнозируемому варианту получили значения и нашли зависимости по плановым и дополнительным заявкам. Так была рассчитана фактическая погрузка при определенных периодах планирования.

В результате изменения периода планирования перевозок грузов и периода, за который подаются заявки до планового периода, определили следующие величины:

x_1 – от регистрации до начала действия заявки ГУ-12 (дней);

x_2 – на какой период подана заявка (дней);

x_3 – календарные дни месяца, на который рассчитывается погрузка;

z – планируемая погрузка (вагонов);

y_1 – всего погружено по накладным (фактическая погрузка) (вагонов);

v_6 – планируемая погрузка по плановым заявкам (вагонов);

v_8 – планируемая погрузка по дополнительным заявкам (вагонов);

v_2 – среднесуточное заявленное число вагонов;

v_3 – среднесуточное отклоненное число вагонов по плану;

v_4 – среднесуточное отказанное число вагонов по плану.

С помощью статистических методов технологии Data Mining построим математические модели интересующих величин, по которым определялись расчетные значения переменных [7].

Планируемая погрузка рассчитывается по формуле, где планируемая погрузка по плановым заявкам суммируется с планируемой погрузкой по дополнительным заявкам:

$$z = v_6 + v_8. \quad (1)$$

Тогда рассмотрим модель планируемой погрузки по плановым заявкам v_6 (см. (1)) в зависимости от x_1, v_2, v_3, v_4, x_2 . Получим линейную зависимость данной модели:

$$v_6 = 3202,91 - 21,95x_1 + 0,0437v_2 + 101,767v_3 - 16,16v_4 + 0,259x_2 + 1,031x_3. \quad (2)$$

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,991$. Квадрат коэффициента корреляции оценивает степень близости исходных данных и соответствующих точек тренда, его максимальное значение равно 1 (полное совпадение графика и линии тренда). Достоверность аппроксимации признается хорошей при R^2 , большего или равного 0,81. Это означает, чем ближе его значение к 1, тем полученная модель точнее описывает данные [8].

Далее построим и сравним наблюдаемые (полученные по каждому варианту величины) и расчетные значения (2). Из рис. 1 следует, что они почти совпадают, а это означает высокую точность модели и дальнейшее ее использование для прогнозирования величин искомой зависимости.

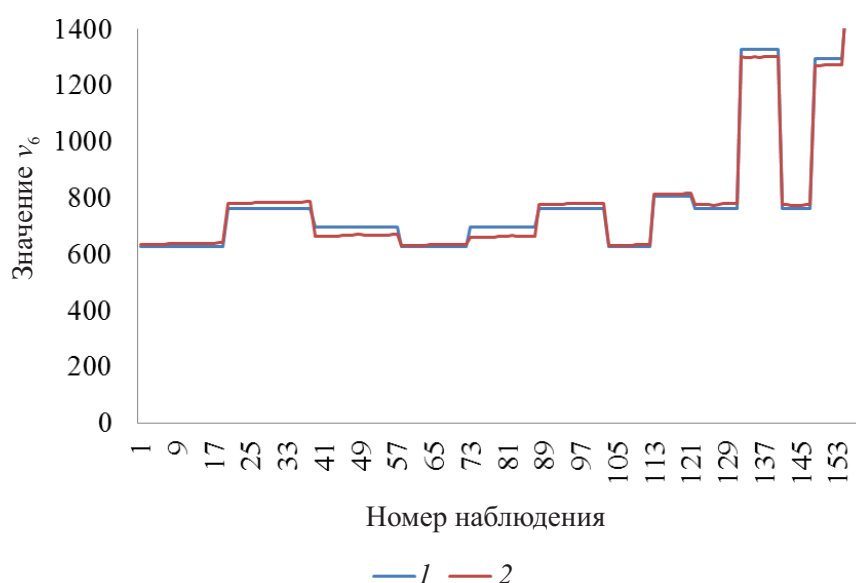


Рис. 1. График наблюдаемых (1) и расчетных (2) значений v_6

Рассмотрим изменение планируемой погрузки по дополнительным заявкам v_8 в зависимости от $x_1, v_2, v_3, v_4, x_2, x_3$. Линейная зависимость для этих данных будет иметь вид

$$v_8 = 3171,03 + 21,87x_1 + 0,914v_2 - 101,985v_3 + 16,1536v_4 - 0,299x_2 + 0,53x_3. \quad (3)$$

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,991$, т. е. модель (3) высокого качества. Далее построим и сравним наблюдаемые и расчетные значения. На рис. 2 можно увидеть, что они почти полностью совпадают, таким образом, данная модель верна.

Соответственно, используя предложенные математические модели, можно найти планируемый объем погрузки вагонов в зависимости от данных параметров.

Затем построим прогнозную математическую модель зависимости фактического числа погруженных вагонов по накладным (y_1) от объема планируемой погрузки вагонов (z).

Коэффициент линейной корреляции для этих переменных составляет 0,994, что говорит о тесной линейной зависимости между

ними. Оцененная с помощью такого математического метода модель парной линейной регрессии имеет вид

$$y_1 = -8,171 + 0,506z. \quad (4)$$

Коэффициенты модели (4) значимы по t -критерию Стьюдента, ее коэффициент детерминации $R^2 = 0,989$, что говорит о высоком качестве регрессии [9].

Диаграмма рассеивания с линией регрессии (4) представлена на рис. 3. По ее виду можно сделать вывод, что скорее всего точки соответствуют какой-то нелинейной зависимости. В противном случае они располагались бы хаотично вокруг прямой линии регрессии. В рассматриваемом случае явно присутствует некая тенденция: остатки сначала отрицательны, потом положительны, затем снова отрицательны.

Подберем нелинейную форму связи. Можно попробовать использовать параболическую функцию.

С помощью метода наименьших квадратов оценим параболическую регрессию [10]

$$y_1 = -570,74 + 1,2872z - 0,0003z^2. \quad (5)$$

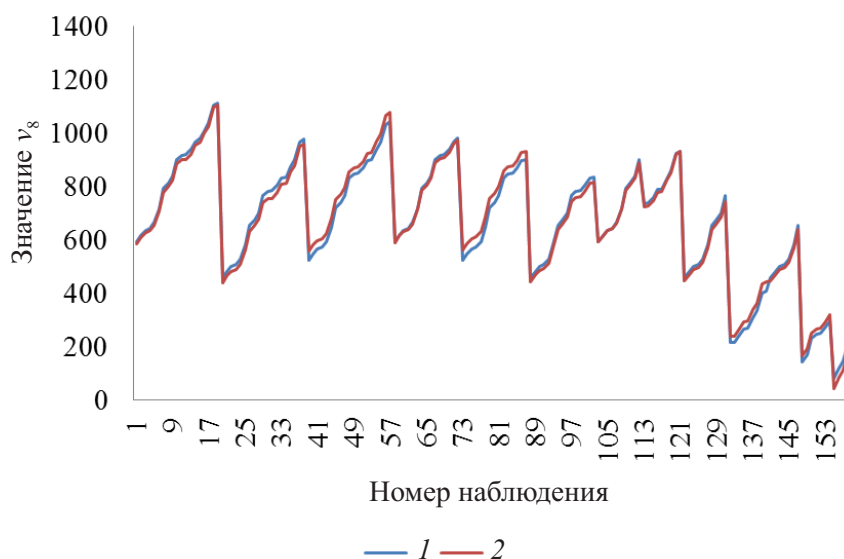


Рис. 2. График наблюдаемых (1) и расчетных (2) значений для v_8

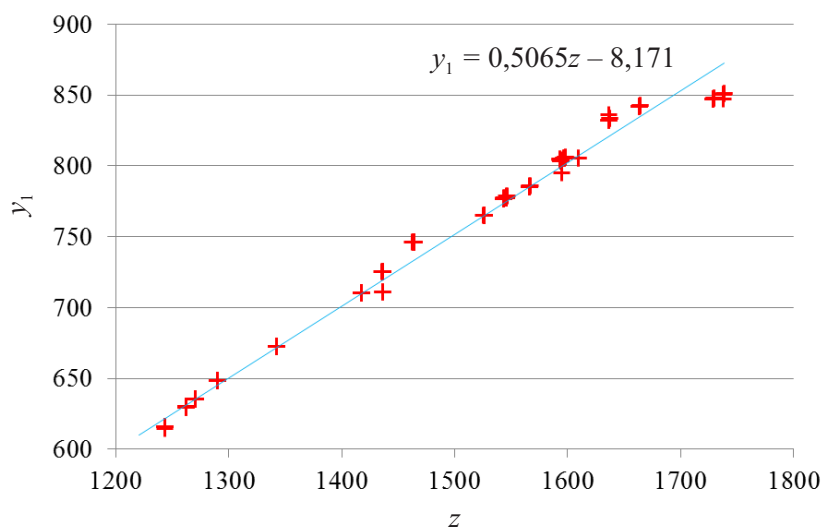


Рис. 3. Диаграмма рассеивания с линией регрессии

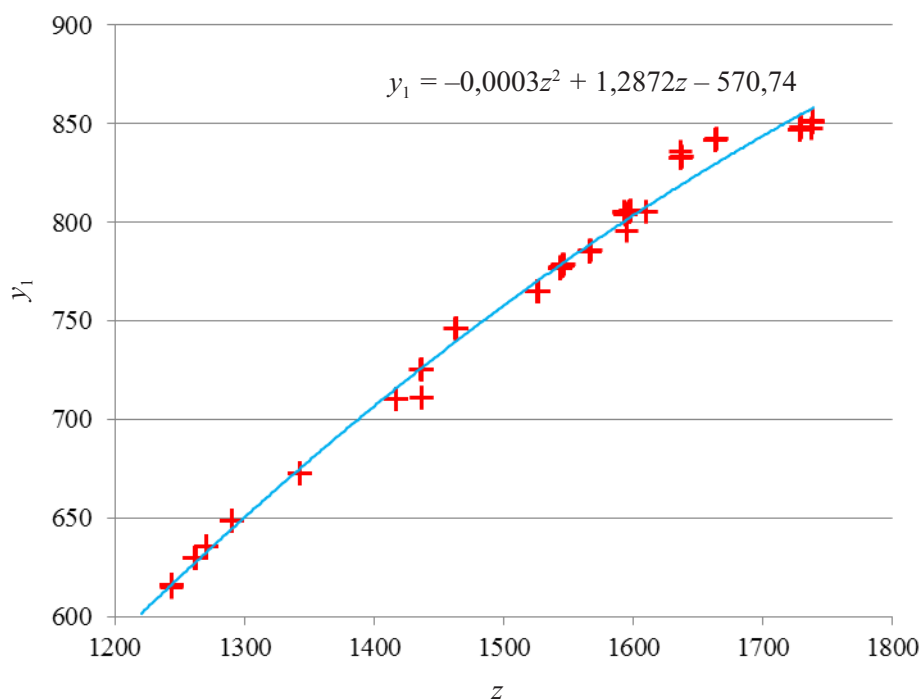


Рис. 4. Диаграмма рассеивания с линией параболической регрессии

Все коэффициенты модели (5) значимы, критерий детерминации $R^2 = 0,995$ стал еще лучше, чем для линейной модели (4).

Диаграмма рассеивания представлена на рис. 4. Как видно, параболическая регрессия точнее описывает данный процесс.

Таким образом, по полученным прогнозным математическим моделям можно оценивать выполнение фактического объема погруженных вагонов от плановых с учетом различных условий (периода планирования, на который подается и действует заявка; даты планируемой

погрузки вагонов; периода от регистрации до начала действия заявки, включая согласование объемов перевозки).

Библиографический список

1. Долгосрочная программа развития ОАО «Российские железные дороги» до 2025 года. – Утв. Правительством РФ № 466-р от 19 марта 2019 г. – М. : ОАО «РЖД», 2019. – 135 с.

2. Осьминин А. Т. Научное решение проблем перевозочного процесса / А. Т. Осьминин // Железнодорожный транспорт. – 2018. – № 12. – С. 12–17.

3. Белозерова И. Г. Сравнительный анализ выполнения погрузки грузов по ДВЖД при различных системах планирования перевозок грузов в смешанном железнодорожно-водном сообщении / И. Г. Белозерова // Научные исследовательские разработки : сб. науч. работ 45-й Междунар. науч. конференции Евразийского Научного Объединения : в 2 т. Т. 1. – М. : Евразийск. науч. объединение, 2018. – Т. 1, № 11 (45). – С. 35–38.

4. Осьминин Л. А. Совершенствование системы планирования перевозок грузов в смешанном железнодорожно-водном сообщении / Л. А. Осьминин, И. Г. Белозерова // Электрон. науч. журн. «Инженерный вестник Дона». – 2012. – № 4/2. – 31 р. – URL : <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/p4p2y2012/1280> (дата обращения : 06.07.2019).

5. Белозерова И. Г. Дефиниция планируемой погрузки в международном железнодорожно-водном сообщении / И. Г. Белозерова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / под ред. А. П. Хоменко. – Иркутск : ИРГУПС, 2012. – С. 209–216.

6. Федеральный закон «Устав железнодорожного транспорта Российской Федерации». – Утв. Президентом РФ, № 18-ФЗ от 10 января 2003 г. (в редакции от 03.08.2018 г.) – М. : Кремль, 2003. – 358 с.

7. Интеллектуальный анализ Data Mining. Обзор методов Data mining. – URL : <http://intellect-tver.ru/?p=165> (дата обращения : 10.07.2019).

8. Коэффициент детерминации (Coefficient of determination). – URL : <https://wiki.loginom.ru/articles/coefficient-of-determination.html> (дата обращения : 11.07.2019).

9. Исмагилов И. И. Эконометрика / И. И. Исмагилов, Е. И. Кадочникова, А. В. Костромин. – Казань : Казан. гос. ун-т, 2014. – 235 с.

10. Метод наименьших квадратов. – URL : <http://www.cleverstudents.ru/articles/mnk.html> (дата обращения : 12.07.2019).

Дата поступления: 18.07.2019

Решение о публикации: 24.07.2019

Контактная информация:

БЕЛОЗЕРОВА Ирина Георгиевна – соискатель;
belozerova.khv@mail.ru

Simulation of the planned loading for various scenarios

I. G. Belozerova

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

For citation: Belozerova I. G. Simulation of planned loading for various scenarios. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 3, pp. 372–379.

DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-372-379 (In Russian)

Summary

Objective: To develop mathematical models for impact assessment of change of such temporary indicators as the period of transport planning of goods, the period starting from registration prior to GU-12 requisition form action, the calendar day (on which loading is settled and planned), on the planned loading

of cars (thus demonstrating different scenarios). To assess the dependence of actually submerged number of cars on the planned one. **Methods:** Statistical methods of Data Mining technology (least squares method, regression analysis) were used in the development of mathematical models. **Results:** Charts of dispersion based on the developed models, diagrams of observed and calculated values, forecast models of dependences of the planned loading according to additional and planned requests from the period of transport planning of goods, the period from registration prior to GU-12 requisition form action, the calendar day for which the loading is calculated and planned as well as the model of dependence of the actual number of the submerged cars from the planned one were presented in the given study. The models are considered by the example of ports and port stations of the Far East railroad. **Practical importance:** According to the received forecast models it is possible to evaluate the period of transport planning of goods with different assigned scenarios of execution of transport planning of goods by means of which the planned loading of cars will be most precisely executed (which can be calculated further on). Thus, the quality of transportation process can be improved. The models in question will allow engineers of the divisions and enterprises, carrying out the organization of transportation process, to predict the planned and actual freight handling at the station depending on the different periods of transport planning of goods, taking into account different conditions and restrictions which need to be considered during the implementation of planning of transportation process.

Keywords: Planning, mathematical model, planned loading, planning period, planning system, least square method, transportation plan.

References

1. *Dolgosrochnaya programma razvitiya OAO "Rossiyskiye zhelezniye dorogi" do 2025 goda [Long-term development program of JSC "Russian Railways" until 2025]*. Approved by the Government of the Russian Federation no. 466-r dated 19 March, 2019. Moscow, OAO "RZhD" [Russian Railways] Publ., 2019, 135 p. (In Russian)
2. Osminin A. T. Nauchnoye resheniye problem perevochnogo protsessa [Scientific solution of problems of transportation process]. *Zheleznodorozhniy transport [Railway transport]*, 2018, no. 12, pp. 12–17. (In Russian)
3. Belozerova I. G. Sravnitelnyy analiz vypolneniya pogruzky gruzov po DVZhD pry razlichnykh sistemakh planirovaniya perevozok gruzov v smeshannom zheleznodorozhno-vodnom soobshchenii [Comparative analysis of cargo loading performance at Far Eastern Railways under different systems of cargo transportation planning in mixed rail and water transport]. *Nauchniye issledovatel'skiye razrabotki. Sb. nauch. rabot 45 Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii Evrasiyskogo Nauchnogo Obyedineniya [Scientific research. Collection of scientific works of the 45th International scientific conference of the Eurasian Scientific Association]*. In 2 vol. Moscow, The Eurasian Scientific Association Publ., 2018, vol. 1, no. 11 (45), pp. 35–38. (In Russian)
4. Osminin L. A. & Belozerova I. G. Sovershenstvovaniye sistemy planirovaniya perevozok gruzov v smeshannom zheleznodorozhno-vodnom soobshchenii [Improving the system of transport planning of goods in mixed railway-water communication]. *Elektronniy nauchniy zhurnal "Inzhenerniy vestnik Dona" [Electronic scientific journal "Engineering Bulletin of the Don"]*, 2012, no. 4/2, 31 p. Available at: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1280> (accessed: 06.07.2019). (In Russian)
5. Belozerova I. G. Definititsiya planiruyemoy pogruzki v mezhdunarodnom zheleznodorozhno-vodnom soobshchenii [Definition of the planned loading in the international railway and water communication]. *Sovremenniye tekhnologii. Sistemniy analiz. Modelirovaniye [Scientific journal "Modern technologies. System analysis. Modeling"]*. Ed. by A. P. Khomenko. Irkutsk, IRGUPS [Irkutsk State University of Communications] Publ., 2012, pp. 209–216. (In Russian)
6. *Federalniy zakon "Ustav zheleznodorozhnoy transporta Rossiyskoy Federatsii" [Federal law "Charter of railway transport of the Russian Federation"]*.

Approved by the President of the Russian Federation no. 18-FZ dated January 10, 2003 (as amended from August 3, 2018). Moscow, the Kremlin Publ., 2003, 358 p. (In Russian)

7. *Intellektualniy analiz Data Mining. Obzor metodov Data mining [Data Mining intelligent analysis. Overview of Data mining methods]*. Available at: <http://intellect-tver.ru/?p=165> (accessed: 10.07.2019). (In Russian)

8. *Koeffitsient determinatsii [Coefficient of determination]*. Available at: <https://wiki.loginom.ru/articles/coefficient-of-determination.html> (accessed: 11.07.2019). (In Russian)

9. Ismagilov I. I., Kadochnikova E. I. & Kostromin A. V. *Ekonometrika [Econometrics]*. Kazan, Kazan State University Publ., 2014, 235 p. (In Russian)

10. *Metod naimen'shih kvadratov [Least square method]*. Available at: <http://www.cleverstudents.ru/articles/mnk.html> (accessed: 12.07.2019). (In Russian)

Received: July 18, 2019

Accepted: July 24, 2019

Author's information:

Irina G. BELOZEROVA – Soiskatel'; belozerova.khv@mail.ru

УДК 621.311

Показатели эксплуатационной надежности системы тягового электроснабжения постоянного тока с продольной питающей линией высокого напряжения

А. Т. Бурков, В. Г. Жемчугов

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

Для цитирования: Бурков А. Т., Жемчугов В. Г. Показатели эксплуатационной надежности системы тягового электроснабжения постоянного тока с продольной питающей линией высокого напряжения // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 3. – С. 380–390. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-380-390

Аннотация

Цель: Выполнить сравнительную оценку по показателям эксплуатационной надежности централизованной системы тягового электроснабжения постоянного тока напряжением 3,3 кВ и перспективной системы распределенного электроснабжения с продольной линией высокого напряжения постоянного тока и импульсными преобразователями для согласования уровней напряжения в контактной сети. **Методы:** Для решения научной задачи применен структурно-логический метод математического моделирования и расчета показателей надежности структурно-сложных систем с помощью специализированного программного комплекса АРБИТР. **Результаты:** Получены оценочные данные показателей надежности для использования при проектировании перспективной системы распределенного тягового электроснабжения постоянного тока с продольной линией высокого напряжения в работах по реконструкции и усилению действующих линий, а также новой электрификации железнодорожных линий постоянного тока. **Практическая значимость:** Разработана структурно-логическая схема имитационной математической модели для оценки эксплуатационной надежности системы тягового электроснабжения. Модель включает новые функции преобразования электрической энергии посредством преобразовательных пунктов согласования уровней напряжения в питающей линии 24 кВ и в контактной сети 3,3 кВ. Предложенная модель позволяет определить влияние существующих ограничений электротяговой инфраструктуры на показатели эксплуатационной надежности системы тягового электроснабжения.

Ключевые слова: Электротяговая сеть, централизованное и распределенное питание, эксплуатационная надежность, безотказность, питающая линия высокого напряжения постоянного тока, преобразовательные пункты согласования напряжения, многоквadrантные импульсные преобразователи.

Варианты системы тягового электроснабжения постоянного тока с уровнем напряжения в контактной сети 3,3 кВ

Оптимизация электроснабжения участка со скоростным или тяжеловесным движением

предполагает нахождение решения за счет поиска рациональных путей преобразования переменного тока в постоянный [1, 2], полного согласования режимов распределения электроэнергии по условию экономичного размещения энергетических мощностей, экономически выгодной передачи электроэнергии

от источников к движущимся поездам при повышенном напряжении и уменьшенных токовых нагрузках и потерях энергии.

В расчетах по выбору мощности преобразовательных агрегатов тяговых подстанций (ТП) учет расходов на повышение скорости не является обязательным. Практически он связан с определением мощности и числа агрегатов подстанции.

Следует отметить [3], что в условиях эксплуатации, наоборот, для экономии энергии целесообразно отключать часть агрегатов в период снижения нагрузки с учетом допустимого понижения уровня напряжения в контактной сети.

Уменьшение расстояния между ТП, что эквивалентно увеличению их количества, на участках с планируемым повышением ско-

рости приводит к падению величины потери напряжения до поездов, но является неэкономичным из-за неоправданных капитальных вложений за счет эффекта повышения скорости. Сокращение расстояний между ТП становится целесообразным только при переходе к системе распределенного питания для реализации скоростного и тяжеловесного движения.

Распределенная схема питания при значительно меньшем сечении проводов контактной сети обеспечивает, благодаря рациональному распределению мощностей в зоне питания, понижение потерь напряжения и энергии по сравнению со схемой централизованного питания [4].

На рис. 1 приведены расчетные схемы системы тягового электроснабжения (СТЭ) централизованного и распределенного питания

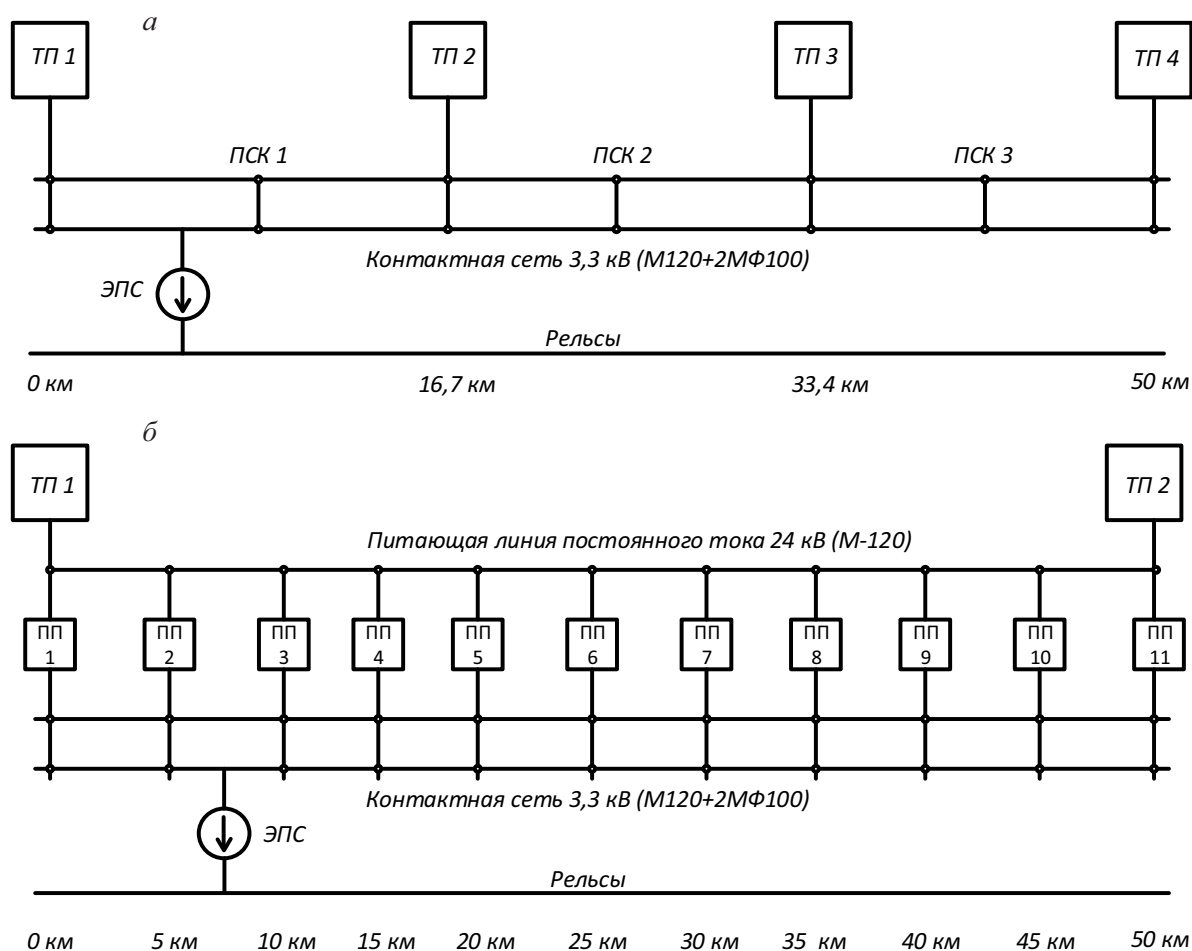


Рис. 1. Схемы систем тягового электроснабжения:
а – централизованное питание; б – распределенное питание

для условного участка магистральной железнодорожной линии длиной 50 км, при равной суммарной установленной мощности силового оборудования.

Для определения параметров системы электроснабжения выполнены тяговые расчеты для грузовых поездов массой $Q = 1800\text{--}6000$ т. При проведении электрических расчетов принят интервал попутного следования $\theta = 8$ мин, что соответствует удельной мощности электропотребления 480 кВт/км. Суммарная мощность установленного силового оборудования (включая резервное) рассматриваемых схем одинакова.

Результаты электрических расчетов (рис. 2) показывают, что в системе распределенного питания потери напряжения и мощности

существенно ниже, чем при схеме централизованного питания. Основной причиной снижения напряжения на токоприемнике электроподвижного состава (ЭПС) является увеличение сопротивления контактной сети (КС) при больших расстояниях между источниками питания.

Количество задействованного оборудования в схеме распределенного питания значительно превосходит количество оборудования в схеме централизованного питания, что влияет на эксплуатационную надежность системы электроснабжения. Поэтому необходимо выполнить сравнение показателей эксплуатационной надежности обеих систем для выбора более рациональной схемы питания электротяговой сети постоянного тока.

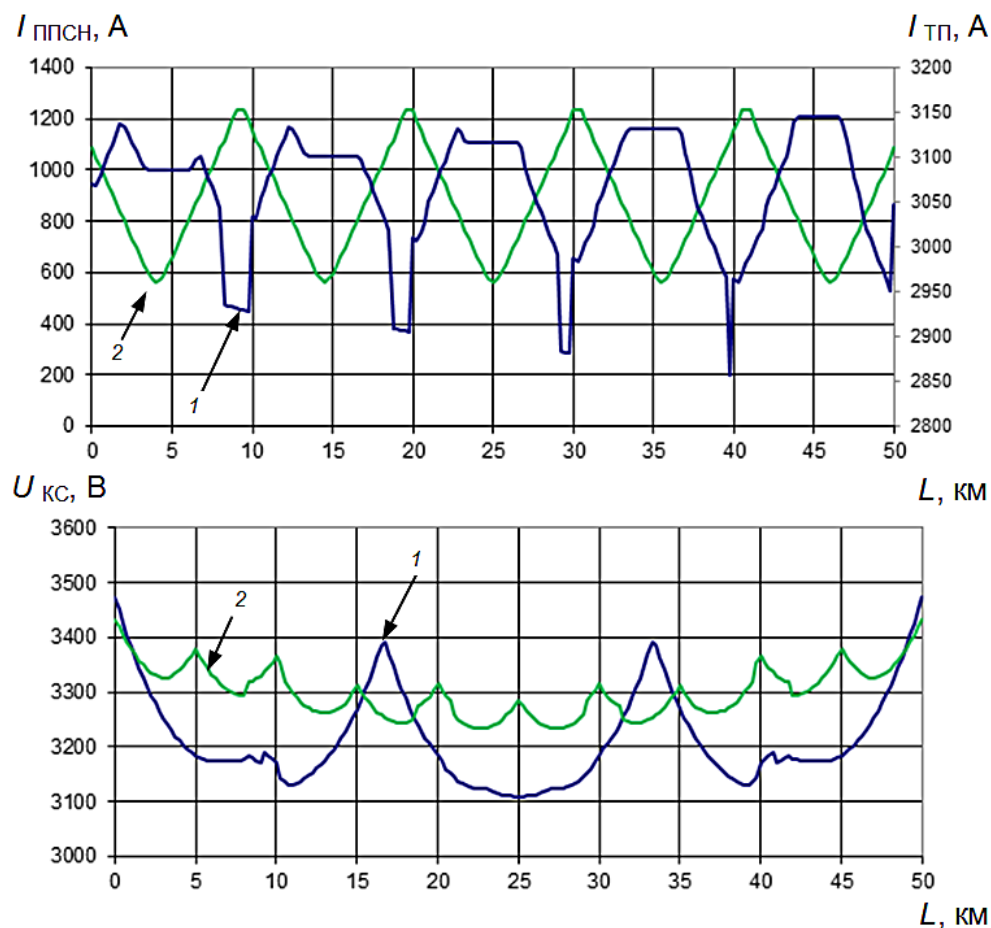


Рис. 2. Диаграммы токов нагрузки ТП и преобразовательных пунктов согласования напряжения (ППСН), а также напряжений на токоприемнике ЭПС при централизованном (1) и распределенном (2) питании

Эксплуатационные показатели надежности систем централизованного и распределенного тягового электроснабжения

Уровень надежности системы тягового электроснабжения непосредственно влияет на бесперебойность движения поездов и является одним из показателей эффективности функционирования железной дороги. Для количественной характеристики надежности применяется сочетание показателей RAMS, введенные в комплексе стандартов, выпущенным Европейским комитетом электротехнической стандартизации CENELEC и предназначенным для использования на железных дорогах.

Рассчитываемые показатели надежности должны соответствовать следующим действующим стандартам и руководящим документам:

- МЭК 62278:2002. Объекты железнодорожного транспорта – требования и подтверждение показателей безотказности, готовности, ремонтпригодности и безопасности (RAMS);
- ГОСТ 27.301–95. Надежность в технике.

Расчет надежности. Основные положения.

Расчет показателей надежности систем электроснабжения основан на применении схемно-логического метода [5–7]. Используются усредненные значения интенсивностей отказов оборудования, среднее время восстановления и ремонта отдельных видов электрооборудования и сетевых элементов, взятые из [8, 9].

Критерием безотказной работы системы тягового электроснабжения принято наличие на токоприемнике электроподвижного состава требуемого уровня напряжения.

При определении показателей надежности был использован специализированный программный комплекс (ПК) «АРБИТР» базовая версия 1.0, правообладатель ОАО СПИК СЗМА, свидетельство № 2003611101 от 12 мая 2003 г. об официальной регистрации программ, Москва, Роспатент РФ, 2003. ПК «АРБИТР» является инструментальным средством поддержки проведения исследовательских,

проектных, эксплуатационных работ и надзорных функций в области автоматизированного моделирования и расчета показателей надежности, живучести и безопасности структурно-сложных систем.

Структурное описание исследуемых свойств системы электроснабжения проведено с помощью специального графического аппарата – схемы функциональной целостности, устанавливающей пути успешного функционирования (сохранения работоспособности) рассматриваемой системы, доставляющей электроэнергию движущемуся поезду.

Расчет централизованной схемы питания

При проведении расчета вероятности безотказной работы системы внешнего электроснабжения (СВЭ) для обеих систем учтено, что ТП связаны с надежными источниками питания линиями электропередачи протяженностью 20 км. Интенсивность отказов ВЛ 110 кВ: $\lambda = 0,009$ 1/год (на 1 км).

Вероятность безотказной работы P находим по формуле

$$P = e^{-\lambda t},$$

где t – время работы, год.

Вероятность безотказной работы одного ввода СВЭ составляет $P_{ВЭ} = 0,83527$.

Надежная работа ТП определяется решениями по выбору варианта схем распределительных устройств высокого напряжения и интенсивностью отказов применяемого оборудования.

Однолинейную и структурную схемы замещения для расчета показателей надежности иллюстрирует рис. 3. Так как вероятности безотказной работы в последовательных схемах соединения элементов перемножаются, то на этом рисунке указаны вероятности безотказной работы редуцированной схемы. Значения вероятностей безотказной работы укрупненных элементов оборудования приведены в табл. 1.

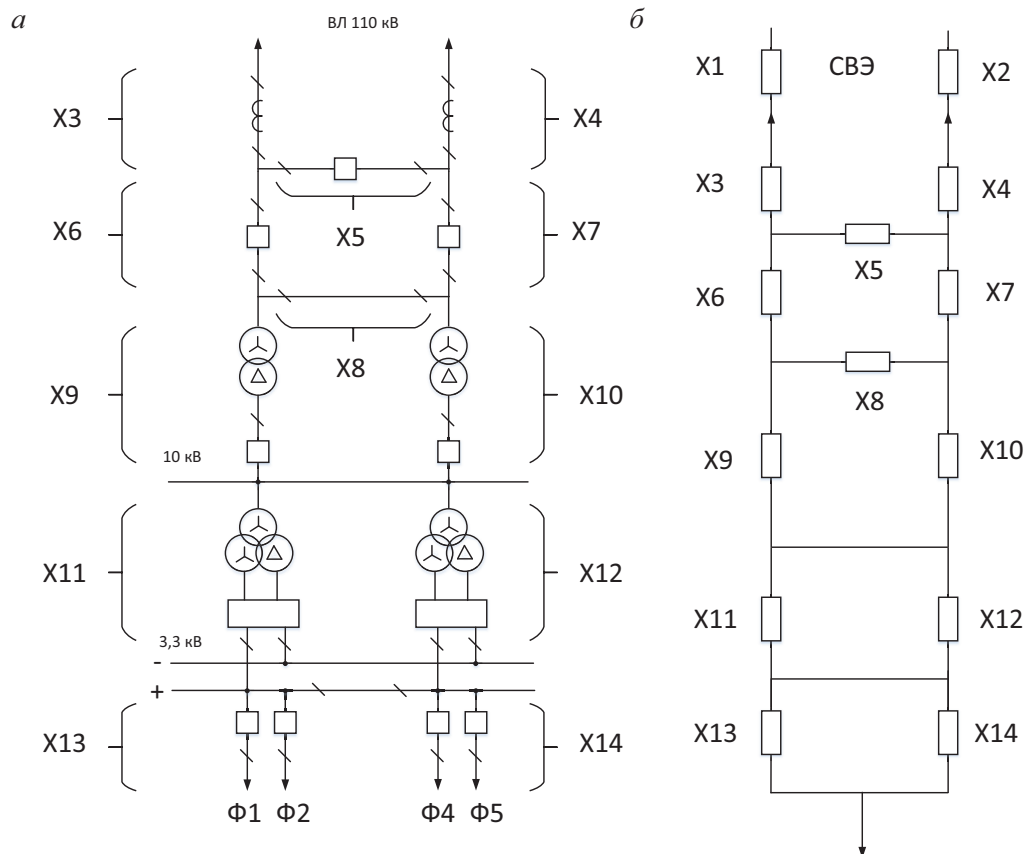


Рис. 3. Однолинейная (а) и структурная (б) схемы ТП централизованной схемы питания

ТАБЛИЦА 1. Вероятности безотказной работы элементов редуцированной схемы ТП

Элемент оборудования	Обозначение	Вероятность безотказной работы
Система внешнего электроснабжения	X1, X2	0,83527
Блок трансформаторов тока	X3, X4	0,941765
Рабочая перемычка с выключателем	X5	0,852144
Блоки выключателей с разъединителями	X6, X7	0,852144
Ремонтная перемычка	X8	0,941765
Понижающие трансформаторы	X9, X10	0,860708
Преобразовательные трансформаторы и выпрямители	X11, X12	0,913931
Питающие линии	X13, X14	0,962713

Вероятность безотказной работы ТП централизованной схемы питания, рассчитанная в ПК АРБИТР, составляет $P_{\text{ТП}} = 0,899498$.

Сеть тягового электроснабжения централизованной схемы питания включает кон-

тактную подвеску, цепь протекания обратного тока, линейные устройства питания и секционирования.

Так как энергия к поезду может подводиться с двух сторон, то для расчета вероятности

безотказной работы тяговой сети (ТС) до точки токосъема ($P_{ТС}$) использована формула, в которой учитывается двойной резерв [6]:

$$P_{ТС} = 1 - (1 - P_1) \cdot (1 - P_2),$$

где P_1 и P_2 – вероятность безотказной работы ТС от соответственно первой и второй ТП.

Вероятности зависят от удаленности поезда от первой ТП:

$$P_1 = e^{-\lambda t}, P_2 = e^{-\lambda(L-l)t},$$

где λ – средняя удельная (покилометровая) интенсивность отказа контактной сети; L – расстояние между соседними подстанциями; l – координата расположения поезда; t – расчетное время, год.

Вероятность надежного электроснабжения поезда до точки токосъема можно охарактеризовать средней вероятностью безотказной работы при его движении по межподстанционной зоне:

$$P_{с\text{ТС}} = \frac{1}{L} \int_0^L (1 - (1 - P_1) \cdot (1 - P_2)) dl =$$

$$= \frac{2}{L \cdot \lambda} \cdot (1 - e^{-\lambda L}) - e^{-\lambda L}.$$

Определим среднюю вероятность безотказной работы ТС $P_{с\text{ТС}}$ при нахождении нагрузки на межподстанционной зоне от ТП1 до ТП2 при централизованной схеме питания. При выполнении расчета необходимо учесть вероятности безотказной работы КС первого и второго пути $P_{КС1}$ и $P_{КС2}$, питающих линий от ТП1 и ТП2 до КС $P_{ПЛ1}$ и $P_{ПЛ2}$, линейных устройств системы тягового электроснабжения $P_{СЕКЦ1}$ и $P_{СЕКЦ2}$. Результаты расчета приведены в табл. 2.

Средняя вероятность безотказной работы ТС на межподстанционной зоне при централизованной схеме питания составляет $P_{с\text{ТС}} = 0,99281$.

Если вероятность безотказной работы первой ТП $P_{ТП1}$, а второй ТП $P_{ТП2}$, то средняя вероятность безотказной работы устройств электроснабжения от источников питания до поезда равна

$$P_{с\text{ТЭ}} = [1 - (1 - P_{ТП1}) \cdot (1 - P_{ТП2})] \cdot P_{с\text{ТС}}.$$

Подставив найденные значения, получим вероятность реализации критерия безотказной

ТАБЛИЦА 2. Вероятности безотказной работы подсистемы ТС до точки токосъема на межподстанционной зоне

l , км	$P_{КС1}$	$P_{СЕКЦ1}$	$P_{ПЛ1}$	$P_{ТС1}$	$P_{КС2}$	$P_{СЕКЦ2}$	$P_{ПЛ2}$	$P_{ТС2}$	$P_{ТС}$
0	1,00000	0,99203	0,99890	0,99094	0,82941	0,97629	0,99890	0,80885	0,99827
2	0,97785	0,99203		0,96899	0,84820	0,97629		0,82717	0,99464
4	0,95619	0,99203		0,94753	0,86741	0,97629		0,84591	0,99191
6	0,93501	0,99203		0,92654	0,88706	0,97629		0,86507	0,99009
8	0,91430	0,99203		0,90601	0,90716	0,97629		0,88467	0,98916
10	0,89404	0,97629		0,87188	0,92771	0,99203		0,91930	0,98966
12	0,87424	0,97629		0,85257	0,94872	0,99203		0,94013	0,99117
14	0,85488	0,97629		0,83368	0,97021	0,99203		0,96142	0,99358
16	0,83594	0,97629		0,81522	0,99219	0,99203		0,98320	0,99690
16,7	0,82941	0,97629		0,80885	1,00000	0,99203		0,99094	0,99827
									$P_{с\text{ТС}} = 0,99281$

работы СТЭ при централизованной схеме питания $P_{СТЭЦ} = 0,982782$.

Расчет распределенной схемы питания

Система распределенного питания включает следующие подсистемы: СВЭ, ТП, продольную линию постоянного тока 24 кВ, проложенную на опорах КС, ППСН 24/3 кВ и КС 3 кВ. Интенсивность отказов продольной однопроводной линии напряжением 24 кВ принимаем равной интенсивности отказов КС постоянного

тока $\lambda_{ВЛ24\text{ кВ}} = 0,009$ 1/год (на 1 км). Вероятность безотказной работы СВЭ принимаем равной $P_{ВЭ} = 0,83527$, ППСН $P_{ППСН} = 0,96$ [10, 11]. Однолинейная и структурная схемы ТП показаны на рис. 4, а, б.

Значения вероятностей безотказной работы укрупненных элементов оборудования приведены в табл. 3.

На основании структурной схемы в ПК АРБИТР составлена схема функциональной целостности, введены показатели надежности работы оборудования, выполнено моделирование и определена вероятность безотказной

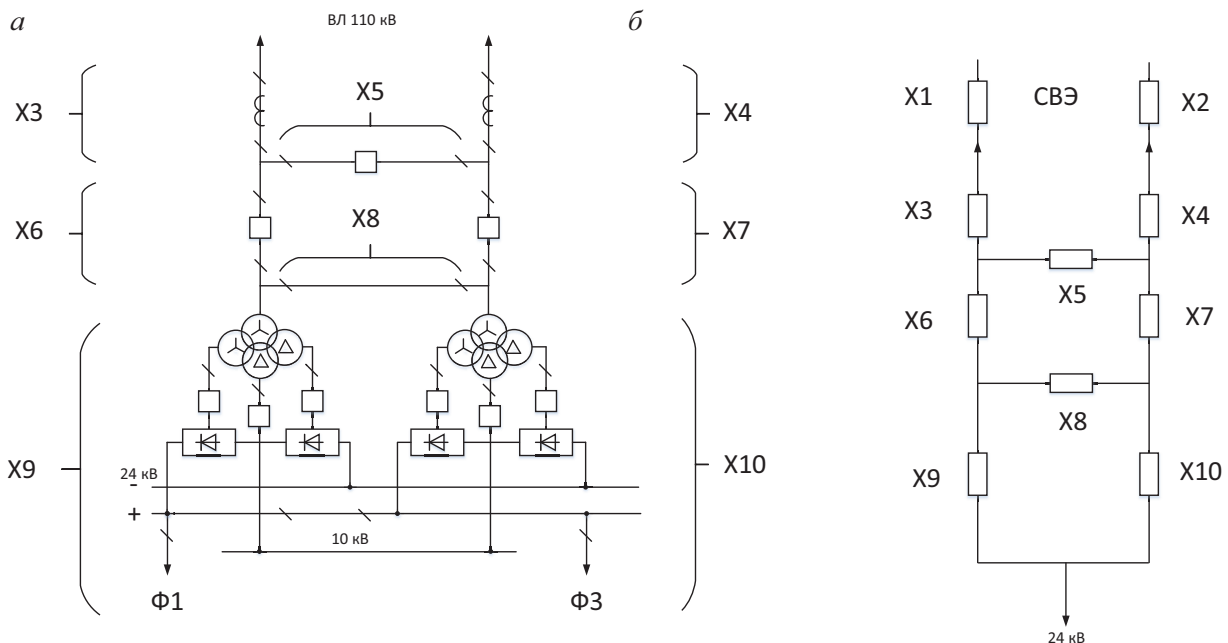


Рис. 4. Однолинейная (а) и структурная (б) схемы ТП при распределенной схеме питания

ТАБЛИЦА 3. Вероятности безотказной работы элементов редуцированной схемы ТП

Элемент оборудования	Обозначение	Вероятность безотказной работы
Система внешнего электроснабжения	X1, X2	0,83527
Блок трансформаторов тока	X3, X4	0,941765
Рабочая перемычка с выключателем	X5	0,852144
Блоки выключателей с разъединителями	X6, X7	0,852144
Ремонтная перемычка	X8	0,941765
Понижающие четырехобмоточные трансформаторы и преобразователи	X9, X10	0,83057

работы ТП при распределенной схеме питания с продольной линией 24 кВ, которая составляет $P_{ТП} = 0,898516$.

Для определения вероятности безотказной работы ТС, включающей продольную линию 24 кВ, ППСН 24/3 кВ и КС, в ПК АРБИТР

составлена модель системы распределенного питания в виде схемы функциональной целостности. Схема модели показана на рис. 5.

Результаты расчета средней вероятности безотказной работы системы тягового электро-снабжения приведены в табл. 4.

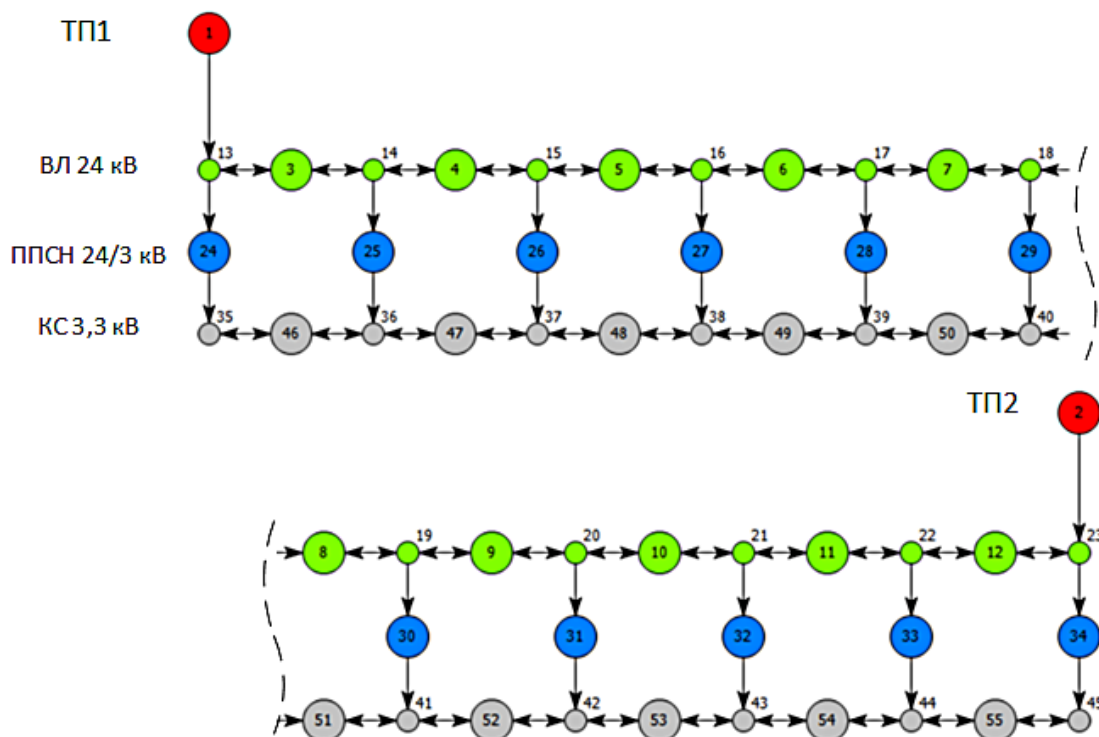


Рис. 5. Схема функциональной целостности системы распределенного питания

ТАБЛИЦА 4. Вероятности безотказной работы СТЭ

№ участка	Расстояние от ТП1, км	Вероятность безотказной работы
1	0	0,980085
2	5	0,982567
3	10	0,983259
4	15	0,983259
5	20	0,983906
6	25	0,983980
7	30	0,983906
8	35	0,983674
9	40	0,983259
10	45	0,982567
11	50	0,980085
$P_{СТЭ}$		0,982777

Средняя вероятность безотказной работы ТС на межподстанционной зоне ТП1–ТП2 при распределенной схеме питания составляет $P_{\text{СТЭР}} = 0,998277$.

Проведенные расчеты показали, что средняя вероятность безотказного электроснабжения ЭПС зависит от длины участка ТС, расположенной между источниками питания. В системе распределенного питания участки примерно в 3 раза короче, чем при централизованном, и получено, что средняя вероятность безотказной работы выше на участке с распределенным питанием.

Выводы

Различие рассмотренных схем питания в количестве оборудования и способах резервирования мощности оказывает влияние на обеспечение требуемого уровня напряжения на токоприемниках ЭПС. Схема распределенного питания имеет лучшие показатели по потерям напряжения и потерям мощности в ТС при равной мощности установленного оборудования.

Полученные значения средней вероятности безотказной работы исследуемых схем позволяют считать, что эксплуатационная надежность схемы распределенного питания не уступает схеме централизованного питания. Система распределенного питания с линией высокого напряжения постоянного тока и ППСН может быть рекомендована для усиления магистральных участков при реализации высокоскоростного и тяжеловесного движения.

Библиографический список

1. Марикин А. Н. Особенности оптимизации подсистемы электроснабжения электрической тяги на железнодорожном транспорте / А. Н. Марикин, К. К. Степанова // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2018. – Т. 15, вып. 3. – С. 414–425.
2. Бурков А. Т. Повышение производительности электрической тяги в долгосрочной перспекти-

ве на новом уровне промышленных технологий / А. Т. Бурков, А. Н. Марикин, А. В. Мизинцев, В. В. Сероносов // Электротехника. – 2018. – № 10. – С. 34–38.

3. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог : учебник для высших учебных заведений ж.-д. транспорта / К. Г. Марквардт. – М. : Транспорт, 1982. – 524 с.

4. Аржанников Б. А. Совершенствование основных требований к системе и устройствам тягового электроснабжения постоянного тока / Б. А. Аржанников, М. П. Бадер, А. Т. Бурков // Электротехника. – 2016. – № 9. – С. 51–57.

5. Рябинин И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем / И. А. Рябинин. – СПб. : Политехника, 2000. – 248 с.

6. Варенцов В. М. К вопросу о расчете надежности систем тягового электроснабжения / В. М. Варенцов // Вестн. ВНИИЖТ. – 2002. – № 6. – 5 с.

7. Варенцов В. М. Особенности оценки надежности продольных линий 10 кВ, подвешенных на опорах контактной сети / В. М. Варенцов // Электрификация и развитие инфраструктуры энергообеспечения тяги поездов скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта. Седьмой Междунар. симпозиум : сб. статей. – СПб. : ПГУПС, 2015. – С. 107–112.

8. Справочник по проектированию электроснабжения / под ред. Ю. Г. Барыбина, под общ. ред. Ю. Н. Тищенко. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

9. Галкин А. Г. Математическое моделирование и информационные технологии в задачах диагностики контактной сети электрифицированных железных дорог : монография / А. Г. Галкин, А. Н. Митрофанов, С. А. Митрофанов. – Екатеринбург : УрГУПС, 2012. – 226 с.

10. Отчет по НИР. Электрификация участка Волховстрой–Свирь Октябрьской железной дороги. Технико-экономическое сравнение вариантов системы электроснабжения на участке Волховстрой–Свирь. Кн. 3. Пояснительная записка. – СПб. : АО «Ленгипротранс», 1997. – 196 с.

11. Варенцов В. М. Оценка надежности преобразователей тяговых подстанций / В. М. Варенцов // Электрификация и научно-технический прогресс на железнодорожном транспорте. Материалы Второго Междунар. симпозиума Eltrans' 2003 : сб. статей / Ред. кол. : В. В. Сапожников, А. Т. Бурков,

А. В. Плакс, В. Н. Егоров. – СПб. : ПГУПС, 2003. – С. 307–310.

Дата поступления: 02.08.2019

Решение о публикации: 12.08.2019

Контактная информация:

БУРКОВ Анатолий Трофимович – д-р техн. наук, профессор; atburkov@gmail.com

ЖЕМЧУГОВ Валерий Григорьевич – ст. преподаватель; zhem@mail.ru

Operating reliability indices for the direct current traction energy system with longitudinal high-voltage line

A. T. Burkov, V. G. Zhemchugov

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

For citation: Burkov A. T., Zhemchugov V. G. Operating reliability indices for the direct current traction energy system with longitudinal high-voltage line. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 3, pp. 380–390. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-380-390 (In Russian)

Summary

Objective: To perform a comparative assessment of the operational reliability of a centralized traction power supply system with a voltage of 3,3 kV and a promising distributed power supply system with a longitudinal direct current high-voltage line and pulse converters for matching voltage levels in the contact network. **Methods:** In order to solve the scientific problem in question, a structurally logical method of mathematical modeling and calculation of reliability indicators in structurally complex systems was applied with the special-purpose ARBITR software system. **Results:** The estimated data of reliability indices (reliability, readiness and maintainability) was obtained for the design of a promising system of distributed DC power supply with a longitudinal high voltage line in the reconstruction and strengthening of existing lines, as well as the new electrification of railway DC lines. **Practical importance:** A structurally logical scheme of a simulation mathematical model was developed in order to assess operational reliability of the traction power supply system. The model includes new functions of electrical energy conversion by means of converting points for voltage level matching in the 24 kV supply line and in the 3,3 kV contact network. The introduced model makes it possible to determine the influence of the existing constraints of the electric traction infrastructure on operational reliability indices of the traction power supply system.

Keywords: Electric traction network, centralized and distributed power supply, operational reliability, reliability, availability, high-voltage supply line of direct current, voltage converting points, multi-quadrant pulse converters.

References

1. Marikin A. N. & Stepanova K. K. Osobennosti optimizatsii podsistemy elektrosnabzheniya elektricheskoy tyagi na zheleznodorozhnom transporte [The electric power supply subsystem of electric traction on railway transport: optimization specificities]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobsh-*

cheniya [Proceedings of Petersburg State University]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2018, vol. 15, iss. 3, pp. 414–425. (In Russian)

2. Burkov A. T., Marikin A. N., Mizintsev A. V. & Seronov V. V. Povysheniye proizvoditelnosti elektricheskoy tyagi v dolgosrochnoy perspektive na novom urovne industrialnykh tekhnologiy [The electric

traction productivity improvement in the long run at a new level of industrial technologies]. *Elektrotehnika [Electrical engineering]*, 2018, no. 10, pp. 34–38. (In Russian)

3. Markvardt K. G. *Elektrosnabzheniye elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog*. Uchebnik dlya vysshikh uchebnykh zavedeniy zh. d. transporta [*Electric power supply for electrified railway lines*. College textbook for railway transport universities]. Moscow, Transport Publ., 1982, 524 p. (In Russian)

4. Arzhannikov B. A., Bader M. P. & Burkov A. T. Sovershenstvovaniye osnovnykh trebovaniy k sisteme i ustroystvam tyagovogo elektrosnabzheniya postoyanogo toka [The improvement of basic requirements for the system and facilities of direct current traction energy]. *Elektrotehnika [Electrical engineering]*, 2016, no. 9, pp. 51–57. (In Russian)

5. Ryabinin I. A. *Nadezhnost i bezopasnost strukturalno-slozhnykh system [Reliability and safety of structurally complicated systems]*. Saint Petersburg, Politehnika Publ., 2000, 248 p. (In Russian)

6. Varentsov V. M. K voprosu o raschete nadezhnosti sistem tyagovogo elektrosnabzheniya [On reliability analysis of traction energy systems]. *Vestnik VNIIZHT [Proceedings of VNIIZhT (All-Russian Research and Development Institute of Railway Transport)]*, 2002, no. 6, 5 p. (In Russian)

7. Varentsov V. M. Osobennosti otsenki nadozhnosti prodolnykh liniy 10 kV, podveshennykh na oporakh kontaktной seti [Reliability assessment specificities of 10 kV longitudinal power lines on contact line support]. *Elektrifikatsiya i razvitiye infrastruktury energoobespecheniya tyagi poyezdov skorostnogo i vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta. Sedmoy Mezhdunarodniy simpozium [Electrification and development of power supply infrastructure for hauling operation of high-speed railway transport. The 7th International Academic Conference]*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2015, pp. 107–112. (In Russian)

8. *Spravochnik po proyektirovaniyu elektrosnabzheniya [Manual on electric power supply design engineering]*. Ed. by Y. G. Barybin. Under gen. ed. of

Yu. N. Tishchenko. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990, 576 p. (In Russian)

9. Galkin A. G., Mitrofanov A. N. & Mitrofanov S. A. *Matematicheskoye modelirovaniye i informatsionnyye tekhnologii v zadachakh diagnostiki kontaktной seti elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog*. Monografiya [*Mathematic simulation and information technologies in tasks on diagnostics of electric railroad contact line*. Monograph]. Yekaterinburg, UrGUPS [Ural State University of Railway Transport] Publ., 2012, 226 p. (In Russian)

10. *Otchet po NIR. Elektrifikatsiya uchastka Volkhovstroy–Svir Oktyabr'skoy zheleznoy dorogi. Tekhniko-ekonomicheskoye sravneniye variantov sistemy elektrosnabzheniya na uchastke Volkhovstroy–Svir [Report for NIR. Electrification of the Volkhovstroy–Svir section. Engineering and economic comparison of electric power supply system options at the Volkhovstroy–Svir section]*. Book 3. Explanatory transaction. Saint Petersburg, AO “Lengiprotrans” Publ., 1997, 196 p. (In Russian)

11. Varentsov V. M. Otsenka nadezhnosti preobrazovateley tyagovykh podstantsiy [Reliability assessment of transducers for traction substations]. *Elektrifikatsiya i nauchno-tekhnicheskiiy progress na zheleznodorozhnom transporte [Electrification and scientific and technological progress in the rail sector]*. *Materialy Vtorogo Mezhdunarodnogo Simposiuma Eltrans'2003 [Proceedings of the 2nd International Academic Conference Eltrans'2003]*. Editorial board: V. V. Sapozhnikov, A. T. Burkov, A. V. Plaks, V. N. Yegorov. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2003, pp. 307–310. (In Russian)

Received: August 02, 2019

Accepted: August 12, 2019

Author's information:

Anatoliy T. BURKOV – D. Sci. in Engineering, Professor; elsabgd@mail.ru

Valeriy G. ZHEMCHUGOV – Senior Lecturer; zhem@mail.ru

УДК 666.762.81:621.83.059.1

Применение композиционных материалов в тормозных системах высокоэнергетичных составов железнодорожного транспорта

А. А. Воробьев¹, Д. А. Жуков¹, К. Л. Лукьяненко¹, В. И. Кулик², А. С. Нилов²

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

² Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, Российская Федерация, 198005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1

Для цитирования: Воробьев А. А., Жуков Д. А., Лукьяненко К. Л., Кулик В. И., Нилов А. С. Применение композиционных материалов в тормозных системах высокоэнергетичных составов железнодорожного транспорта // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 3. – С. 391–400. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-391-400

Аннотация

Цель: Оценка перспектив использования современных фрикционных композиционных материалов, включающих керамические компоненты, для изготовления тормозных дисков систем торможения высокоскоростного железнодорожного транспорта. **Методы:** Проведен анализ современного состояния и тенденций развития дисперсно-наполненных и волокнисто-армированных композиционных материалов с металлической, углеродной и керамической матрицами для тормозных дисков высокоскоростного железнодорожного транспорта. **Результаты:** Описаны возможности внедрения изученных фрикционных композиционных материалов. Рассмотрены наиболее оптимальные составы этих типов композитов и технологические методы формования на их основе тормозных дисков. **Практическая значимость:** Показана перспективность использования алюмоматричных композиционных материалов с дисперсными керамическими наполнителями и углеволокнистых керамоматричных композитов с карбидокремниевой матрицей в качестве фрикционных материалов для энергонагруженных тормозных систем железнодорожного транспорта. Выделены их достоинства и недостатки, а также области наиболее эффективного применения по сравнению с традиционными фрикционными материалами (сталь и чугун): для алюмоматричных композитов – это снижение неподрессоренных масс, а для керамоматричных – уменьшение массы и повышение тормозной мощности.

Ключевые слова: Тормозная система поезда, композиционный материал, дисковый тормоз, фрикционный материал, металлокерамика, углерод-углеродный композит, керамоматричный композит, триботехнические характеристики.

Введение

К тенденциям развития и совершенствования железнодорожного транспорта относятся повышение мощности тяговых единиц подвижного состава, увеличение скорости движения, весовой нормы и вместимости поездов. В системе «колесо–рельс» в современных

условиях технически реальной и экономически оправданной является скорость, близкая к 350 км/ч. При этом максимальная скорость высокоскоростных составов может быть существенно выше (Shinransen, Япония – 443 км/ч, TVG, Франция – 575 км/ч, ICE, Германия – 406 км/ч, CRN, Китай – 486 км/ч) [1]. В таких условиях особую актуальность приобретает

проблема торможения, поскольку необходимо обеспечить безопасность движения и выполнить постоянно возрастающие нормативные требования к величине тормозного пути, времени торможения и допускаемому замедлению. В настоящее время в железнодорожном транспорте широко используются дисковые и колодочные тормоза. Однако при современных диапазонах скорости колодочный тормоз уже давно исчерпал свои возможности, прежде всего из-за растущих тепловых нагрузок, связанных с постоянным увеличением скорости движения поездов. Дальнейшее повышение тормозной мощности на оси (более 800 кВт) оказалось возможным только с применением дисковых тормозов, которые имеют значительные преимущества по сравнению с колодочными, связанные с более широким выбором фрикционных материалов пары трения и конструктивными особенностями – поверхность трения находится на тормозном диске, что позволяет значительно снизить температуру при торможении вследствие более интенсивного отвода тепла в длительном режиме и др. [2].

При этом энергоемкость и качество торможения дисковых тормозов во многом определяются материалами фрикционного сопряжения «тормозная колодка (накладка) – тормозной диск». В современных тормозных системах высоконагруженного железнодорожного транспорта для изготовления тормозных дисков и колодок помимо традиционных серого чугуна и сталей широко применяют различные современные композиционные материалы (КМ). Следует отметить, что применительно к тормозным колодкам существует большой спектр КМ, их рецептур и конструктивного исполнения, разрабатываемых для конкретных условий эксплуатации. Более подробно фрикционные КМ для тормозных колодок, а также их функциональные возможности и технологии получения рассмотрены в работе [3].

Сейчас в конструкциях тормозных дисков различных высоконагруженных транспортных средств все большее применение находят дисперсно-наполненные или волокнисто-армированные КМ с металлической, угле-

родной и керамической матрицами [3, 4]. В данной работе проведен анализ современного состояния и тенденций развития этих типов фрикционных КМ для тормозных дисков высокоскоростного железнодорожного транспорта.

Тормозные диски железнодорожного транспорта из КМ с металлической матрицей

Для больших тормозных мощностей в настоящее время часто применяется металлокерамика, которая характеризуется высоким коэффициентом трения и умеренной зависимостью коэффициента трения от температуры, скорости движения (для железнодорожных систем торможения уменьшение с начальных 0,4–0,35 до 0,3–0,25 при скорости 150 км/ч) и влажности [5]. Металлокерамические материалы для фрикционных пар трения, как правило, состоят из абразивного армирующего материала (SiO_2 , SiC , Al_2O_3 , ZrSiO_4 , TiC , TiB_2 , B_4C и др.), фрикционной добавки (графит, кокс, MoS_2 и др.), металлической матрицы (Al-сплавы, бронза, Fe, Ni, Co, Cu и др.) и различных модифицирующих добавок. Наиболее известные марки металлокерамики: BECORIT VM40 (Германия), ФМК-11, МКМ-2, СМК-80, МКВ-50 А (Россия), Диафрикт К-4 (Чехия) и др. [6, 7]. Использование металлокерамики позволяет в 2–2,5 раза снизить массу конструкции по сравнению с металлом и повысить износостойкость в 3 и 10 раз по сравнению с композитами с полимерной матрицей и чугуном соответственно [7].

Впервые тормозные диски из металломатричного композита (ММК) с алюминиевой матрицей и дисперсными абразивными наполнителями были внедрены в эксплуатацию в начале 1990-х годов. Их появление было обусловлено прежде всего стремлением уменьшить величину неподрессоренных масс тележек подвижного состава. К достоинствам данных тормозных дисков, кроме указанных выше, относятся также хорошая теплопроводность

и лучшее рассеяние тепла при его отводе от контактных поверхностей, что обуславливает снижение температурных напряжений и соответственно повышение прочности. В настоящее время алюмоматричные тормозные диски признаны приемлемыми для подвижного состава всех видов и применяются, например, на скоростных немецких поездах InterCity Express. Как правило, для этих целей используются ММК на базе стандартных сплавов систем Al-Mg и Al-Si с содержанием частиц SiC и Al₂O₃ не менее 20 об. %. Внедрение алюмоматричных тормозных дисков дает экономию 448 кг на ось тележки или более 11 т на поезд (таблица) [8].

Существует значительное число технологических процессов получения ММК: твердофазные, газофазные и жидкофазные. По экономическим и качественным показателям предпочтительными являются жидкофазные методы, из которых для фрикционных тормозных дисков железнодорожного транспорта практическое применение нашли технологии, основанные на замешивании дискретных частиц в металлических расплавах (в частности, фирмы-производители Bergische Stahl Industrie (BSI), Knorr Bremse (Германия) и др.) и на пропитке расплавами пористых каркасов из порошков (в частности, фирма-производитель Zhejiang Tianle New Material Technology Co., Ltd, Китай).

Формование тормозных дисков по технологии замешивания предполагает введение дискретных частиц SiC или Al₂O₃ в расплав алюминиевых сплавов с последующим перемешиванием с помощью импеллера и далее с использованием различного рода литейных методов создания конечного изделия. Технология изготовления тормозных дисков пропиткой расплавами пористых каркасов предполагает выкладку предварительно созданных пористых SiC или Al₂O₃ каркасов в литейную форму с последующей ее заливкой расплавом (рис. 1) [9].

Тем не менее, несмотря на достаточно высокие массово-энергетические характеристики алюмоматричных тормозных дисков, их применение на железнодорожном транспорте ограничивается скоростью 200–250 км/ч [10], хотя имеется информация о режимах эксплуатации такого рода дисков со скоростями до 350 км/ч, правда без условий частого торможения [9].

Тормозные диски железнодорожного транспорта из КМ с углеродной матрицей

Фрикционные КМ на основе углеродной матрицы и углеродных волокон (углерод-углеродные композиционные материалы –

Типовые пары трения и их некоторые массово-энергетические характеристики для высокоскоростного железнодорожного транспорта

Материал диска	Материал накладок	Энергия торможения, МДж	Масса диска с накладками, кг
Серый чугун	КМ на полимерной основе	12	140
Алюмоматричный КМ	КМ на полимерной основе, металлокерамика	12	84
Сталь	Металлокерамика	35	140
Сталь с керамическим покрытием	КМ на керамической основе	50	140
Керамоматричные КМ	КМ на керамической основе	60	55

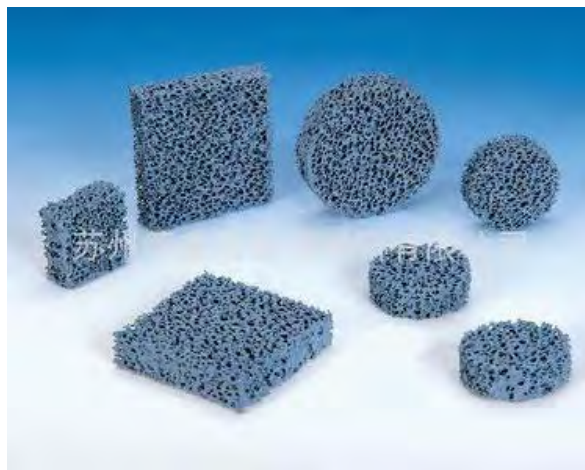
а*б**в*

Рис. 1. Пористые спеченные керамические каркасы (*а* – из Al_2O_3 , *б* – из SiC) и тормозной диск для железнодорожных составов из алюмоматричного ММК, полученный по технологии жидкофазной пропитки керамических пористых каркасов (*в*) [9]

УУКМ) могут быть получены двумя способами или их комбинациями – жидкофазным, карбонизацией полимерной матрицы углепластикового полуфабриката (PIР-процессы), или газофазным, осаждением пироуглерода из углеродсодержащей газовой среды в пористом волокнистом каркасе (CVI-процессы). Наиболее известные марки УУКМ: Карбеникс-4000 (США), SEPCARB (Франция), ДАС-1 (Корея), СТД, «АРГОЛОН», ТЕРМАР (Россия) и др. [11, 12]. Главными достоинствами фрикционных УУКМ являются высокий коэффи-

циент трения, особенно при повышенных температурах (0,7–0,8 при температурах свыше 673–873 К) [11], теплостойкость углеродной основы (свыше 1000 °С), размерно-температурная стабильность. Кроме того, коэффициент трения характеризуется невысокой его чувствительностью от удельного контактного давления, скорости движения, влажности воздуха.

Основные недостатки УУКМ как фрикционного материала в тормозных системах – его низкий коэффициент трения (0,05–0,28) при

невысоких (до 523 К) температурах, небольшая теплопроводность в направлении, перпендикулярном поверхности трения, и достаточно значительный износ, в том числе из-за интенсивного поверхностного окисления выше 450 °С [5, 13]. Для надежной эксплуатации тормозных дисков из УУКМ требуются их предварительный прогрев и поддержание в нагретом состоянии. Частично такие проблемы могут быть решены путем введения в состав композиции абразивных материалов и модификаторов, таких как SiC, Al₂O₃, B₄C, бор и металлические порошки или волокна (например, медные) [14, 15]. При этом начальный коэффициент трения может быть повышен более чем в 2 раза, правда, при этом происходит некоторое снижение максимальных величин коэффициента трения [5].

Тем не менее, несмотря на достаточно широкие возможности модифицирования материала диска из УУКМ, имеющиеся негативные свойства такого материала не дают в полной мере рассматривать тормозные диски из УУКМ в качестве перспективных при использовании их в тормозных системах железнодорожного транспорта.

Тормозные диски железнодорожного транспорта из КМ с керамической матрицей

Дальнейшее повышение эффективности дискового тормоза ожидается от внедрения главным образом композитов с керамической матрицей (керамоматричные композиты – КМК). Среди современных волокнистых КМК выделяются композиты с SiC-матрицей, армированные углеродными волокнами (C_f/SiC), хотя имеется информация об успешном создании КМК дисков с Si₃N₄-матрицей, армированных углеродными волокнами [16].

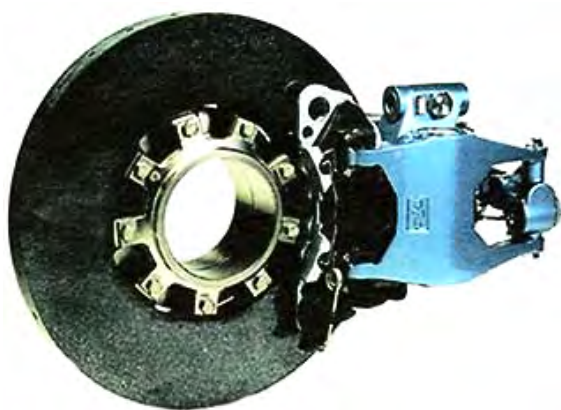
Благодаря исключительно высокой твердости, стойкости к абразивному износу и тепловому удару, способности выдерживать температуры 1200 °С и выше, C_f/SiC-композиты

являются одними из самых перспективных современных материалов для изделий триботехнического и главным образом фрикционного назначения. В последнее время эти фрикционные материалы эффективно используются в авиационной технике, автомобилестроении, космических аппаратах многоразового использования и др. [17]. Фрикционные элементы из КМК либо прогнозируются, либо уже применяются в высокоскоростных поездах TVG (Франция), Talent (Германия), Pendolino (Италия), АРТ (Англия), AVE (Испания), HSR-350х (Корея), Shinkansen (Япония) и в ряде других (рис. 2).

Преимущество использования фрикционных карбидокремниевых КМК заключается в большом снижении массы тормозного диска по отношению к стальному (50% и более (см. таблицу)) при увеличивающейся мощности, а также в способности выдерживать большие перегрузки. В перспективе после внедрения этих КМК ожидается рост преобразуемой энергии до 100 МДж, а тормозной мощности – до 1100 кВт на колесную пару.

Наиболее общая схема производства изделий из КМК включает следующие операции: 1) получение волокнистого каркаса (преформы) с хаотичным или ориентированным расположением волокон; 2) насыщение (уплотнение) волокнистого каркаса матричным материалом; 3) механическая обработка полученной заготовки. В настоящее время вторую наиболее важную операцию технологического процесса – уплотнение каркаса – реализуют с помощью различных твердо-, жидко- и газофазных методов, а также их комбинаций [19]. Среди методов получения фрикционных изделий из КМК наибольшую привлекательность, с экономической точки зрения, имеют жидкофазные методы: PIP-процессы (основанные на пиролизе кремнийсодержащей полимерной матрицы углепластикового полуфабриката) и LSI-процессы (основанные на жидкофазном силицировании пористых заготовок, в состав которых входят углеграфитовые компоненты). Более подробно операции насыщения каркаса рассмотрены в работе [20].

а



б

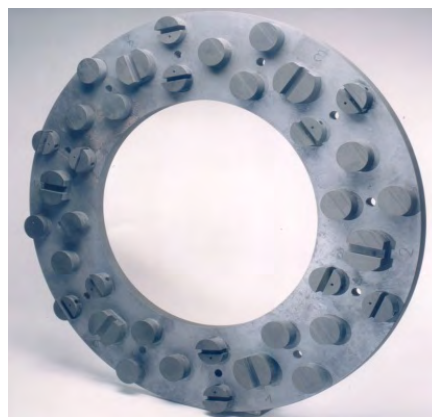


Рис. 2. Тормозные диски из КМК для железнодорожных скоростных подвижных составов: а – фирмы Knorr Brake Company [15]; б – фирмы DLR [18]

Разработка пары трения на базе тормозного диска из КМК должна обеспечивать необходимые триботехнические показатели (значительный и стабильный коэффициент трения, низкие показатели износа, прежде всего тормозного диска), способность выдерживать высокие температуры при экстренном торможении (более 1000 °С), длительные сроки эксплуатации и др. Такие условия эксплуатации могут обеспечить только контртела из металлокерамики на базе железа и аналогичные КМК [3].

В работах [3, 21, 22] были проведены исследования по определению триботехнических характеристик (коэффициент трения в зависимости от скорости и средний износ контртела) для образцов из КМК в паре с контртелом из фрикционной металлокерамики, изготовленной на основе железа с добавлением керамических порошков карбида кремния и нитрида алюминия, а также в паре с карбидокремниевым КМК. Была показана высокая эффективность рассмотренных пар трения по сравнению с традиционными парами на основе металлических дисков. Полученные данные позволили обосновать выбор пар трения, обеспечивающих высокий и стабильный коэффициент трения при приемлемых значениях скорости износа элементов фрикционной пары. Установлено, что из изученных пар трения лучшими триботехническими характери-

ками обладает пара из диска, изготовленного с применением КМК с SiC-матрицей и металлокерамических колодок на основе железа с включениями порошков карбида кремния.

Заключение

Результаты проведенного анализа показали перспективность применения алюмоматричных КМ с дисперсными керамическими наполнителями и углеволокнистых КМК с карбидокремниевой матрицей в качестве фрикционных материалов для тормозных дисков энергонагруженных систем торможения железнодорожного транспорта. Выделены их достоинства и недостатки, а также области наиболее эффективного использования по сравнению с традиционными фрикционными материалами (сталь и чугун): для алюмоматричных композитов – это снижение неподрессоренных масс тележек подвижного состава, а для КМК – уменьшение массы и повышение тормозной мощности.

Библиографический список

1. Chen J. Temperature field and thermal stress analyses of high-speed train brake disc under pad variations / J. Chen, F. Gao // The Open Mechanical Engineering Journal. – 2015. – Vol. 9. – P. 371–378.

2. Мошков А. А. Разработка дискового тормоза для отечественного скоростного железнодорожного транспорта / А. А. Мошков, Е. С. Сипягин // Транспорт Российской Федерации. – 2013. – № 6. – С. 62–65.
3. Нилов А. С. Анализ фрикционных материалов и технологий изготовления тормозных колодок для высоконагруженных тормозных систем с дисками из керамического композиционного материала / А. С. Нилов, В. И. Кулик, А. П. Гаршин // Новые огнеупоры. – 2015. – № 7. – С. 57–68.
4. Гаршин А. П. Фрикционные материалы на основе волокнисто-армированных композитов с углеродной и керамической матрицей для систем торможения / А. П. Гаршин, В. И. Кулик, А. С. Нилов // Новые огнеупоры. – 2008. – № 9. – С. 54–60.
5. Старченко В. Н. Фрикционные материалы на базе углерод-углеродных и углерод-асбестовых волокон для тормозных устройств / В. Н. Старченко, В. А. Гурин, В. П. Быкадоров, Е. Н. Шапран // Железные дороги мира. – 2006. – № 2. – С. 38–42.
6. Асташкевич Б. М. Перспективы использования металлокерамических материалов во фрикционных узлах подвижного состава / Б. М. Асташкевич, И. Н. Воронин // Вестн. ВНИИЖТ. – 2000. – № 5. – С. 31–37.
7. Вуколов Л. А. Сравнительные фрикционные характеристики металлокерамических и полимерных композиционных тормозных колодок / Л. А. Вуколов, В. А. Жаров // Вестн. ВНИИЖТ. – 1999. – № 4. – С. 19–24.
8. Reducing train mass – the effect of standards on train braking systems. – Phase 2. – Report N ITLR-T20057-002. – 2008. – Iss. 1. – 46 p.
9. Barberis D. Reduction of the unsprung and of the rotating mass on railway axles – Ceramic foam/aluminum alloy composite brake disc for Fuel, Pollution and LCC reduction / D. Barberis, F. Shu, F. Ming // EuroBrake2015/EB2015-BAS-005. – 2015. – 12 p.
10. Brake dicks and pads. – URL: https://www.knorr-bremse.com/remote/media/documents/railvehicles/product_broschures/brake_systems/Brake_Discs_Pads_P_1264_EN.pdf (дата обращения : 05.07.2019).
11. Коконин С. С. Высоконагруженные многодисковые тормоза и факторы, определяющие эффективность и плавность их работы / С. С. Коконин, Г. Я. Обижаев, Б. С. Окулов и др. // Тяжелое машиностроение. – 2001. – № 4. – С. 19–26.
12. Gouider M. Mass spectrometry during C/C composite friction carbon oxidation associated with friction coefficient and high wear rate / M. Gouider, Y. Berthier, P. Jacquemard, B. Rousseau // Wear. – 2004. – Vol. 258. – P. 1082–1087.
13. Старченко В. Н. Исследование трибологических характеристик фрикционных C–C композитов / В. Н. Старченко, М. В. Павленко, В. В. Овчаренко // Вісник СНУ ім. Володимира Даля. – 2011. – № 6. – С. 105–109.
14. Патент US 7338987. Friction material composition and friction material using the same / M. Ono, T. Nagayoshi, M. Inoue et al. – Заявл. 21.05.2004 г.; опубл. 04.03.2008 г.
15. Schlosser W. Moderne Bremssysteme für Schienenfahrzeuge / W. Schlosser, S. Aurich // ZEV + DET Glasers Annalen. – 2001. – N 8. – P. 273–277.
16. Rak Z. S. CMC material for train brake systems / Z. S. Rak // British Ceramic Transactions. – 2000. – Vol. 99, iss. 6. – P. 270–273.
17. Krenkel W. C/C–SiC composites for hot structures and advanced friction systems / W. Krenkel // Ceramic engineering and science proceedings. – 2003. – N 24 (4). – P. 583–592.
18. CMC Technology and Structures. – URL: http://www.dlr.de/bt/en/desktopdefault.aspx/tabid-2499/6930_read-10079/ (дата обращения : 05.07.2019).
19. Костиков В. И. Сверхвысокотемпературные композиционные материалы / В. И. Костиков, Ф. Н. Варенков. – М. : Интермет Инжиниринг, 2003. – 560 с.
20. Гаршин А. П. Современные технологии получения волокнисто-армированных композиционных материалов с керамической огнеупорной матрицей / А. П. Гаршин, В. И. Кулик, С. А. Матвеев, А. С. Нилов // Новые огнеупоры. – 2017. – № 4. – С. 20–35.
21. Кулик В. И. Исследование триботехнических характеристик композиционных материалов с карбидокремниевой матрицей / В. И. Кулик, А. С. Нилов, А. П. Гаршин и др. // Новые огнеупоры. – 2012. – № 8. – С. 45–56.
22. Blau P. J. Research on non-traditional materials for friction surfaces in heavy vehicle disc brakes / P. J. Blau. – Reports ORNVTM-2004/265, 2004. – 42 p.

Дата поступления: 10.07.2019
Решение о публикации: 19.07.2019

Контактная информация:

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич – д-р техн. наук, доцент; vorobev_alex@mail.ru
ЖУКОВ Дмитрий Александрович – канд. техн. наук, доцент; dmitr_zhukov@mail.ru

ЛУКЪЯНЕНКО Кирилл Леонидович – аспирант; kir_luk@mail.ru

КУЛИК Виктор Иванович – канд. техн. наук, доцент; viktor.i.kulik@gmail.com

НИЛОВ Алексей Сергеевич – канд. техн. наук, доцент; alexey.s.nilov@gmail.com

Application of composite materials in brake systems of high-power railway trains

A. A. Vorobyev¹, D. A. Zhukov¹, K. L. Lukyanenko¹, V. I. Kulik², A. S. Nilov²

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

² Baltic State Technical University “VOENMEKH” named after D. F. Ustinov, 1, 1-ya Krasnoarmeiskaya ul., Saint Petersburg, 198005, Russian Federation

For citation: Vorobyev A. A., Zhukov D. A., Lukyanenko K. L., Kulik V. I., Nilov A. S. Application of composite materials in brake systems of high-power railway trains. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 3, pp. 391–400. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-391-400 (In Russian)

Summary

Objective: To assess the prospects of using modern friction composite materials, including ceramic components, for the production of brake discs used in brake systems of high-speed railway transport. **Methods:** The analysis of the current state and development trends of dispersion-filled and fiber armored composite materials with metal, carbon and ceramic matrices for brake discs of high-speed railway transport was carried out. **Results:** The possibilities of introducing the studied friction composite materials were described. Optimum compositions of the composites in question were considered as well as the methods of processing brake discs from such types of composites. **Practical importance:** Application availability of aluminum matrix composite materials with disperse ceramic fillers was demonstrated as well as carbon-fiber ceramic matrix composites with silicon carbide matrix acting as friction materials for power loaded railway brake systems. The advantages and disadvantages of such materials as well as the spheres of most effective application compared to traditional friction materials (steel and cast iron) were singled out. Thus, it is the reduction of unsprung mass for aluminum matrix composites and the reduction of mass and brake power ascension for ceramic matrix composites.

Keywords: Train braking system, composite material, disc brake, friction material, ceramic metal, carbon-carbon composite, ceramic matrix composite, tribotechnical characteristics

References

1. Chen J. & Gao F. Temperature field and thermal stress analyses of high-speed train brake disc under pad variations. *The Open Mechanical Engineering Journal*, 2015, vol. 9, pp. 371–378.

2. Moshkov A. A. & Sipyagin E. S. Razrabotka diskovogo tormoza dlya otechestvennogo skorostnogo zheleznodorozhnogo transporta [Disk brake design for domestic railway transport]. *Transport Rossiyskoy Federatsii [Transport of the Russian Federation]*, 2013, no. 6, pp. 62–65. (In Russian)

3. Nilov A. S., Kulik V.I. & Garshin A. P. Analiz friktsionnykh materialov i tekhnologiy izgotovleniya tormoznykh kolodok dlya vysokonagruzhennykh tormoznykh system s diskamy iz keramicheskogo kompozitsionnogo materiala [The analysis of friction materials and manufacturing process of clasp blocks for heavy loaded brake systems with ceramic composite discs]. *Noviye ognepory* [New refractory materials], 2015, no. 7, pp. 57–68. (In Russian)
4. Garshin A. P., Kulik V.I. & Nilov A. S. Friktsionniye materialy na osnove voloknisto-armirovannykh kompozitov s uglerodnoy i keramicheskoy matritsey dlya system tormozheniya [Friction materials based on fiber armored composites with carbon and ceramic matrix for break systems]. *Noviye ognepory* [New refractory materials], 2008, no. 9, pp. 54–60. (In Russian)
5. Starchenko V.N., Gurin V.A., Bykadorov V.P. & Shapran E.N. Friktsionniye materialy na baze uglerod-uglerodnykh i uglerod-asbestovykh volokon dlya tormoznykh ustroystv [Friction materials based on carbon-carbon and carbon-asbestos fibers for lock gears]. *Zhelezniye dorogy mira* [Railroads of the world], 2006, no. 2, pp. 38–42. (In Russian)
6. Astashkevich B.M. & Voronin I.N. Perspektivy ispolzovaniya metallokeramicheskikh materialov vo friktsionnykh uzlakh podvizhnogo sostava [Application prospects for sintered metal powder materials in RS friction assemblies]. *Vestnik VNIIZHT* [Proceedings of VNIIZhT (All-Russian Research and Development Institute of Railway Transport)], 2000, no. 5, pp. 31–37. (In Russian)
7. Vukolov L.A. & Zharov V.A. Sravnitelniye friktsionniye kharakteristiki metallokeramicheskikh i polimernykh kompozitsionnykh tormoznykh kolodok [Comparative friction characteristics of ceramic metal and polymer composite brake blocks]. *Vestnik VNIIZHT* [Proceedings of VNIIZhT (All-Russian Research and Development Institute of Railway Transport)], 1999, no. 4, pp. 19–24. (In Russian)
8. *Reducing train mass – the effect of standards on train braking systems*. Phase 2. Report no. ITLR-T20057–002, 2008, iss.1, 46 p.
9. Barberis D., Shu F. & Ming F. Reduction of the unsprung and of the rotating mass on railway axles – Ceramic foam/aluminum alloy composite brake disc for Fuel, Pollution and LCC reduction. *Euro-Brake2015/EB2015-BAS-005*, 2015, 12 p.
10. *Brake discs and pads*. Available at: https://www.knorr-bremse.com/remote/media/documents/railvehicles/product_broschures/brake_systems/Brake_Discs_Pads_P_1264_EN.pdf (accessed: 05.07.2019).
11. Kokonin S. S., Obizhaev G. Y., Okulov B. S. et al. Vysokonagruzhenniye mnogodiskoviye tormoza i factory, opredelyayushchiye effektivnost i plavnost ikh raboty [Heavy loaded multiple disc brakes and factors determining their efficiency and smoothness of operation]. *Tyazheloye mashinostroeniye* [Heavy engineering], 2001, no. 4, pp. 19–26. (In Russian)
12. Gouider M., Berthier Y., Jacquemard P. & Rousseau B. Mass spectrometry during C/C composite friction carbon oxidation associated with friction coefficient and high wear rate. *Wear*, 2004, vol. 258, pp. 1082–1087.
13. Starchenko V.N., Pavlenko M.V. & Ovcharenko V.V. Issledovaniye tribologicheskikh kharakteristik friktsionnykh S–S kompozitov [The study of tribological characteristics of friction C/C composites]. *Visnik SNU im. Volodimira Dalya* [Proceedings of Vladimir Dahl Lugansk National University], 2011, no. 6, pp. 105–109. (In Russian)
14. *Patent US 7338987. Friction material composition and friction material using the same*. M. Ono, T. Nagayoshi, M. Inoue et al. Appl. May 21, 2004; publ. March 04, 2008.
15. Schlosser W. & Aurich S. Moderne Bremssysteme für Schienenfahrzeuge. *ZEV + DET Glasers Annalen*, 2001, no. 8, pp. 273–277.
16. Rak Z. S. CMC material for train brake systems. *British Ceramic Transactions*, 2000, vol. 99, iss. 6, pp. 270–273.
17. Krenkel W. C/C–SiC composites for hot structures and advanced friction systems. *Ceramic engineering and science proceedings*, 2003, no. 24 (4), pp. 583–592.
18. *CMC Technology and Structures*. Available at: http://www.dlr.de/bt/en/desktopdefault.aspx/tabid-2499/6930_read-10079/ (accessed: 05.07.2019).
19. Kostikov V.I. & Varenkov F.N. *Sverkhvysokotemperaturniye kompozitsionniye materialy* [Extreme high-temperature composite materials]. Moscow, Intermet Engineering Publ., 2003, 560 p. (In Russian)
20. Garshin A. P., Kulik V. I., Matveev S. A. & Nilov A. S. Sovremenniye tekhnologii polucheniya voloknisto-armirovannykh kompozitsionnykh materialov s keramicheskoy ognepornoj matritsey [Modern

technologies for processing fiber armored composite materials with ceramic flame-proof matrix]. *Noviye ognepory* [*New refractory materials*], 2017, no. 4, pp. 20–35. (In Russian)

21. Kulik V. I., Nilov A. S., Garshin A. P. et al. Issledovaniye tribotekhnicheskikh kharakteristik kompozitsionnykh materialov s karbidkremnievoy matritsey [The study of tribotechnical characteristics of composite materials with silicon carbide matrix]. *Noviye ognepory* [*New refractory materials*], 2012, no. 8, pp. 45–56. (In Russian)

22. Blau P. J. *Research on non-traditional materials for friction surfaces in heavy vehicle disc brakes*. Reports ORNVTM-2004/265, 2004, 42 p.

Received: July 10, 2019

Accepted: July 19, 2019

Author's information:

Aleksander A. VOROBYEV – D. Sci. in Engineering, Associate Professor; vorobev_alex@mail.ru

Dmitriy A. ZHUKOV – Cand. Sci. in Engineering, Associate Professor; dmitr_zhukov@mail.ru

Kirill L. LUKYANENKO – Postgraduate Student; kir_luk@mail.ru

Viktor I. KULIK – Cand. Sci. in Engineering, Associate Professor; victor.i.kulik@gmail.com

Aleksey S. NILOV – Cand. Sci. in Engineering, Associate Professor; alexey.s.nilov@gmail.com

УДК 629.421.083

Анализ теплового состояния тяговых электродвигателей по данным микропроцессорной системы управления тепловоза

П. В. Дворкин, Д. Н. Курилкин

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

Для цитирования: Дворкин П. В., Курилкин Д. Н. Анализ теплового состояния тяговых электродвигателей по данным микропроцессорной системы управления // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 3. – С. 401–409.
DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-401-409

Аннотация

Цель: Проанализировать возможность контроля теплового состояния тяговых электродвигателей с использованием микропроцессорной системы управления тепловозом. Описать алгоритм расчета температуры нагрева обмоток тяговых электродвигателей на основе этой системы управления. Определить зависимость температуры тяговых электродвигателей от профиля движения и веса подвижного состава. **Методы:** Проводились анализ неисправностей тяговых электродвигателей за определенный промежуток времени, анализ регистрируемых параметров микропроцессорной системой управления тепловозом, анализ методов расчета температуры нагрева обмоток тяговых электродвигателей, а также сравнение значений температуры тяговых электродвигателей в поездке и рассчитанных с помощью предложенного алгоритма. **Результаты:** Получен действующий алгоритм расчета температуры нагрева обмоток тягового электродвигателя, на базе которого появляется возможность вывода на дисплейный модуль машинисту информации о тепловом состоянии электрической машины, предупреждения об опасном режиме работы и даны рекомендации по возвращению его в нормальное состояние. **Практическая значимость:** Показаны возможность контроля теплового состояния тягового электродвигателя на базе показаний микропроцессорной системы управления, что позволит в дальнейшем разработать автоматическую систему защиты тяговых электродвигателей, а также изменение способа управления охлаждением по реальной температуре тягового электродвигателя.

Ключевые слова: Тяговый электродвигатель, микропроцессорная система управления тепловозом, нагрев тягового электродвигателя, тяговый расчет, диагностика тягового электродвигателя.

Введение

В настоящее время пропускные способности некоторых железнодорожных участков исчерпаны полностью, но в то же время эффективность грузоперевозок продолжает расти за счет увеличения длины и массы поездов, так как это является действующим способом повышения показателей перевозочного процесса.

Однако при увеличении веса поезда возрастает и нагрузка на тяговые электродвигатели локомотива, что приводит к большим значениям тока, протекающего по ним, и их последующему перегреву и отказу.

В статье рассматривается вопрос контроля теплового состояния тяговых электродвигателей с использованием микропроцессорной системы управления тепловозом.

Анализ проблемы неисправностей тягового электродвигателя

Тяговый электродвигатель является агрегатом, состоящим из множества дорогих и конструктивно сложных узлов и деталей. Именно ему приходится реализовывать тяговые свойства локомотива, и поэтому особое внимание уделяется контролю его технического состояния.

Неправильные условия эксплуатации электрической машины приводят к ее повреждениям и неисправностям. Все повреждения электрических машин тепловозов можно разделить на две группы: к одной группе – наибольшей – относятся повреждения электрических частей, а ко второй – механических.

Практика показывает, что из общего количества неисправностей электрических машин число случаев повреждений генераторов и двухмашинных агрегатов составляет около 5%, а остальная часть относится к тяговым электродвигателям. Чаще всего неисправности тяговых электродвигателей возникают в процессе непосредственной эксплуатации локомотива, приводят к его постановке на непланный ремонт, что показывает статистика, взятая по депо, осуществляющих эксплуатацию тягового подвижного состава на тяжелом профиле (таблица).

Анализ данных таблицы показывает, что чаще всего неисправность тягового электро-

двигателя ведет к постановке локомотива на непланный ремонт. Большая часть таких дефектов заключается в повреждении изоляции токоведущей части электрической машины.

Причиной появления такого рода неисправностей являются потери энергии, преобразуемые в тепло, что вызывает сокращение срока службы машин, старение изоляции, образование микротрещин и др. Для предотвращения этих дефектов необходимо отслеживать в реальном времени тепловое состояние токоведущих частей тягового электродвигателя, что возможно выполнить, используя микропроцессорную систему управления тепловозом.

Определение температуры тягового электродвигателя по данным микропроцессорной системы управления тепловозом

Для определения температуры тяговых электродвигателей применяется аналитический метод, описанный в правилах тяговых расчетов. Теоретической основой данного расчета стали закон сохранения энергии и теория нагревания однородного тела [1–5]. Под однородным понимают тело, обладающее бесконечно большой теплопроводностью и равномерным рассеянием энергии со всей поверхности, причем все точки тела имеют одинаковую температуру.

Распределение количества ремонтов тягового электродвигателя по видам ремонтов

Тип локомотива	Вид ремонта	Количество ремонтов
Электровоз	ТР-1	8
	ТР-2	1
	ТР-3	0
	Непланный ремонт	48
Тепловоз	ТР-1	9
	ТР-2	0
	ТР-3	0
	Непланный ремонт	33

Метод заключается в определении превышения температуры обмоток тягового электродвигателя в зависимости от изменения тока $I = I(s)$ и при использовании тепловых параметров τ_∞ и T , характеризующих интенсивность теплообмена электрических машин данного типа. Расчет осуществляется по формуле

$$\tau = \tau_\infty \frac{\Delta t}{T} + \tau_0 \left(1 - \frac{\Delta t}{T}\right), \quad (1)$$

где τ_∞ – установившееся превышение температуры при условии отсутствия передачи тепла в окружающую среду и накопления всего тепла в теле, °C; T – тепловая постоянная времени, с; τ_0 – превышение температуры в мо-

мент выключения тока, °C; Δt – интервал времени, в течение которого происходит изменение температуры, с. При этом должно быть выдержано соотношение $\frac{\Delta t}{T} \leq 0,1$.

Остывание тяговых электрических машин во время стоянки или при следовании локомотива на холостом ходу рассчитывается следующим образом:

$$\tau = \tau_0 \left(1 - \frac{\Delta t}{T_0}\right), \quad (2)$$

здесь T_0 – тепловая постоянная времени при выключенном токе.

Для получения данных о температуре нагрева обмоток тягового электродвигателя не-

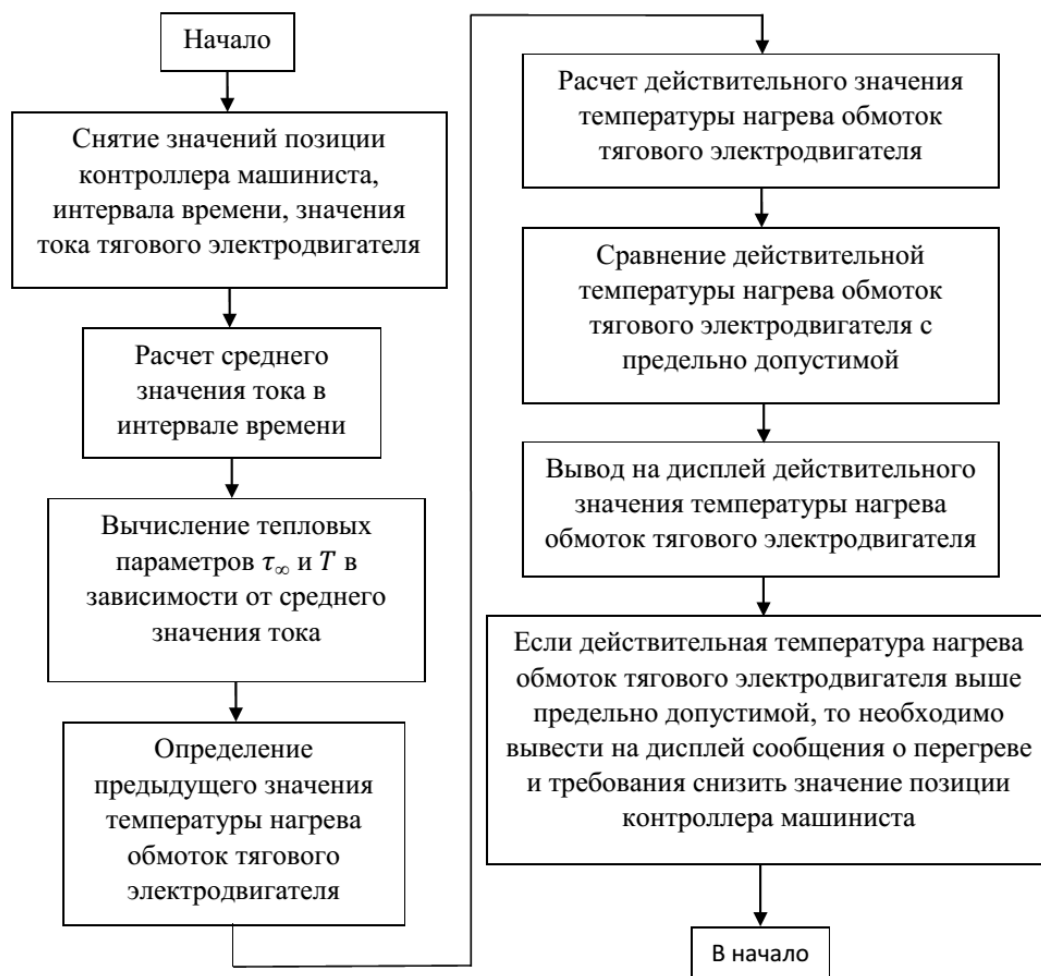


Рис. 1. Структура расчета температуры нагрева обмоток тягового электродвигателя

обходимо знать параметры, характеризующие его работу: ток, протекающий по обмоткам, позицию контроллера машиниста и время его работы. Получить эти данные возможно за счет использования микропроцессорной системы управления тепловозом, поскольку она предназначена для управления и регулирования режимами работы основного и вспомогательного оборудования локомотива, а также для выполнения функций бортового диагностического устройства.

Алгоритм расчета температуры нагрева обмоток тягового электродвигателя

Для определения температуры нагрева обмоток тягового электродвигателя на основании данных, предоставленных микропроцессорной системой управления тепловозом, следует применить аналитический метод расчета. Для создания алгоритма расчета сначала необходимо составить его структуру (рис. 1).

Прежде всего микропроцессорная система управления тепловозом снимает значения позиции контроллера машиниста, тока тягового электродвигателя и первый интервал времени снятия параметров, который станет шагом для последующих диагностик тепловоза.

Следующим этапом является расчет среднего значения тока между начальным и конечным значениями на интервале времени, так как на протяжении всего интервала времени ток меняется и потому для расчета требуется усреднить такое изменение. В начале работы тепловоза ток, протекающий по обмоткам тягового электродвигателя, и их температуры нагрева равны нулю. После чего по среднему значению тока из графиков кривых тепловых характеристик тягового электродвигателя находятся тепловые параметры τ_{∞} и T . Затем определяется предыдущая температура нагрева обмоток тягового электродвигателя.

Далее рассчитывается действительное значение температуры нагрева обмоток тягового электродвигателя по формулам (1) и (2) в за-

висимости от текущей тяговой позиции. Оно сравнивается с предельно допустимой температурой, превышение которой приведет к повреждению изоляции проводников.

На основании структуры нагрева (рис. 1) обмоток тягового электродвигателя появляется возможность создания его алгоритма, изображенного на рис. 2.

Алгоритм начинается с присвоения начальных значений [6–10] следующим параметрам:

1) $x := x_1$, где x – среднее значение тока тягового электродвигателя, а x_1 – значение тока тягового электродвигателя на момент начала работы алгоритма, измеряются в А;

2) $t := t_1$, где t – значение температуры нагрева обмоток тягового электродвигателя, а t_1 – значение температуры нагрева обмоток тягового электродвигателя на момент начала работы алгоритма, измеряются в °С;

3) $r := 0$, где r – текущее значение времени работы микропроцессорной системы управления тепловозом, $0 \leq r \leq 3600$ с, после достижения значения в 3600 с обнуляется и начинает увеличиваться заново;

4) $k := 0$, где k – параметр, необходимый для работы счетчика времени.

Параметры x_1 и t_1 равны нулю при длительной стоянке тепловоза. Если тепловоз находится в движении при переходе с одного часа работы на другой, то эти параметры берутся из энергонезависимого запоминающего устройства микропроцессорной системы управления тепловозом.

Далее в алгоритме происходит задание интервала опроса всех узлов диагностики микропроцессорной системой управления тепловозом. Этим интервалом z является первое зарегистрированное системой время после 0 или разница по модулю двух любых смежных значений.

Следующим шагом работы алгоритма является определение параметров, необходимых для расчета нагрева тяговых электродвигателей по имеющимся показателям тока. Для этого использовались данные реальной поездки и моделирование поездки в программе «Тяговый

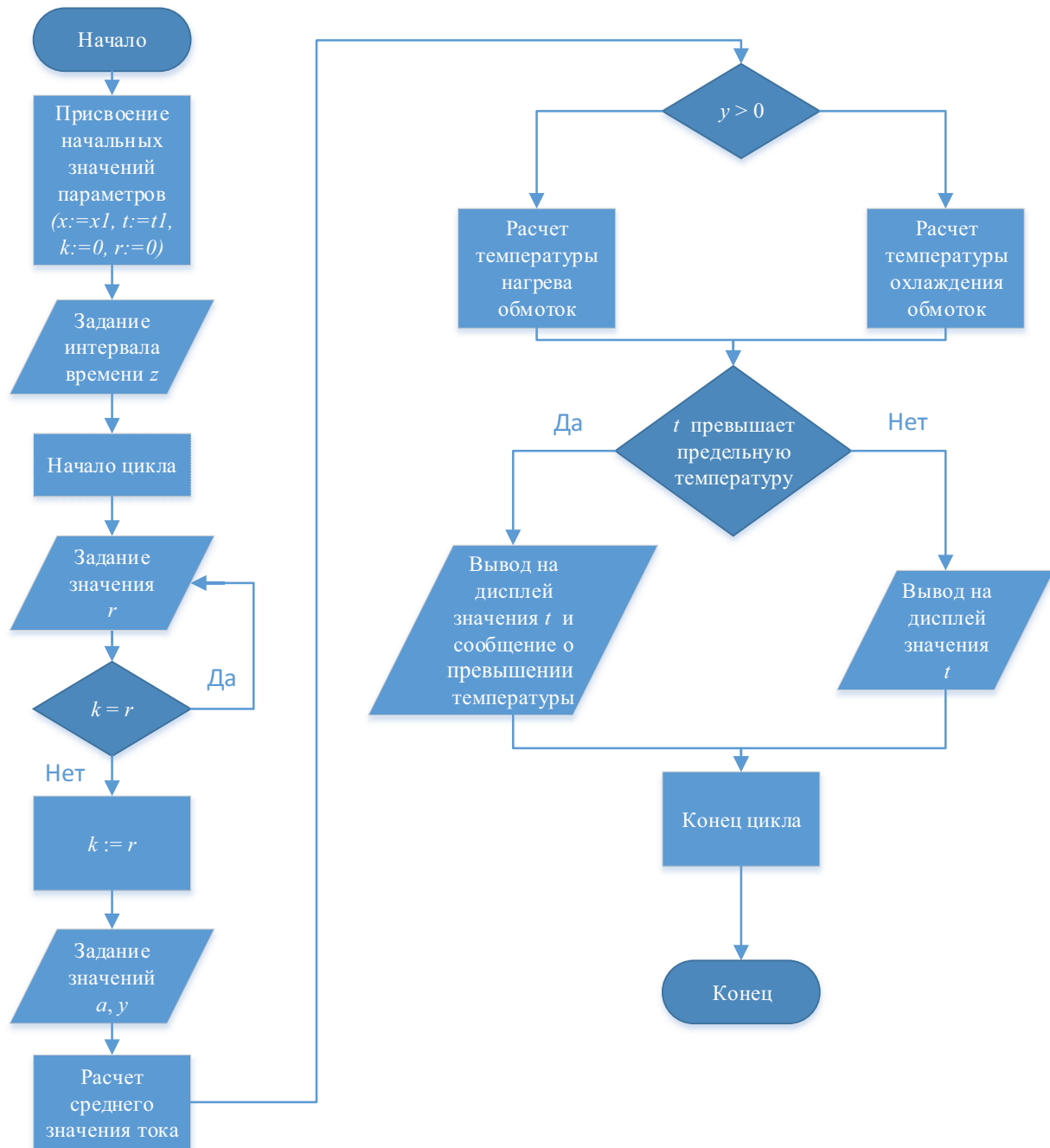


Рис. 2. Алгоритм расчета температуры нагрева обмоток тягового электродвигателя

расчет». Пример смоделированной поездки в программе приведен на рис. 3.

Согласно алгоритму расчета, в первую очередь находится интервал регистрации параметров (Δt), в данном примере определяющийся разницей смежных значений времени. После чего на этом интервале производится расчет среднего значения тока тягового электродви-

гателя. Далее оценивается позиция контроллера машиниста. Так как ее значение не равно нулю в конце интервала, то тепловоз находится в режиме тяги, а значит, происходит процесс нагрева обмоток тягового электродвигателя. Для определения температуры такого нагрева необходимо установить по диаграмме тепловых характеристик электродвигателя значения

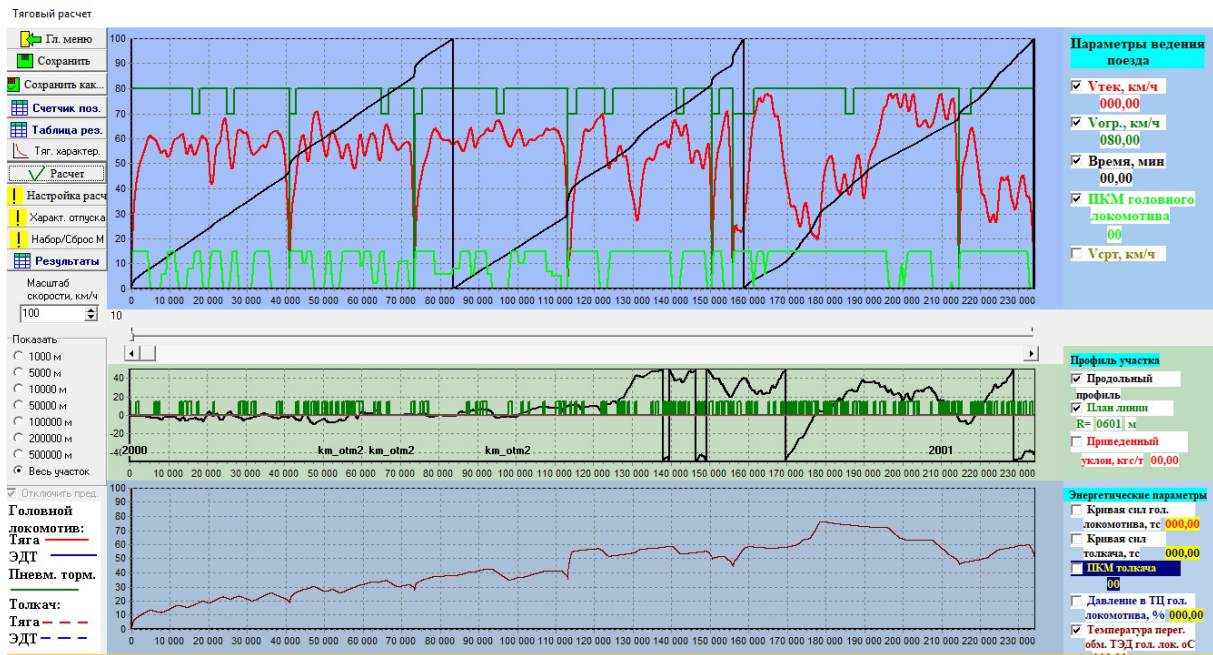


Рис. 3. Моделирование поездки в программе «Тяговый расчет»

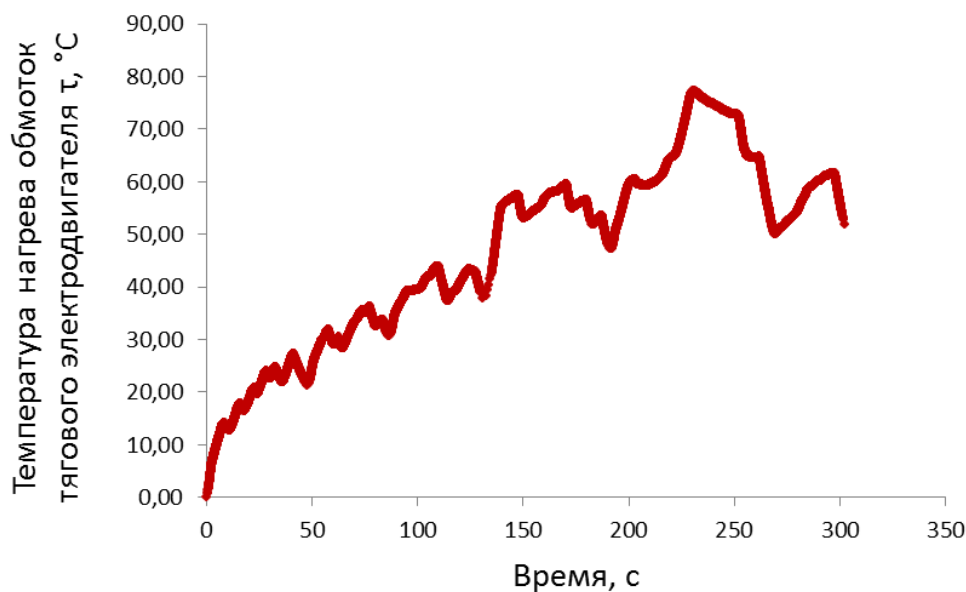


Рис. 4. График нагрева обмоток тягового электродвигателя

тепловых параметров (T и τ_{∞}) для полученного среднего значения тока. Для работы микропроцессорной системы управления тепловозом эти кривые были описаны в виде полиномиальных функций:

$$T = 4,085 \cdot 10^{-17} \cdot I_{cp}^6 - 2,027 \cdot 10^{-13} \times \\ \times I_{cp}^5 + 3,1193 \cdot 10^{-10} \cdot I_{cp}^4 - 1,726 \cdot 10^{-7} \times$$

$$\times I_{cp}^3 + 5,108 \cdot 10^{-5} \cdot I_{cp}^2 + \\ + 5,468 \cdot 10^{-3} \cdot I_{cp} + 26,012, \quad (3)$$

$$\tau_{\infty} = -2,851 \cdot 10^{-15} \cdot I_{cp}^6 + 9,435 \times \\ \times 10^{-12} \cdot I_{cp}^5 - 1,169 \cdot 10^{-8} \cdot I_{cp}^4 + \\ + 7,045 \cdot 10^{-6} \cdot I_{cp}^3 - 2,111 \cdot 10^{-3} \times \\ \times I_{cp}^2 + 0,354 \cdot I_{cp} + 0,126. \quad (4)$$

В результате использования вышеописанного алгоритма (см. (1)–(4)) построили диаграмму изменения температуры на основании данных реальной поездки. Диаграмму будет рассчитывать микропроцессорная система управления тепловозом (рис. 4). Как видно из рисунка, полученная кривая совпадает с графиком нагрева обмоток тягового электродвигателя, представленного в моделируемой поездке, что говорит о возможности использования данного алгоритма для определения температуры нагрева тяговых электродвигателей в поездке.

Заключение

В статье был произведен анализ неисправностей тяговых электродвигателей, который показал, что при росте веса поезда происходит повышение значения токов, протекающих по тяговым электродвигателям, которое приводит к их перегреву и дальнейшему отказу. В то же время результатом анализа регистрируемых параметров микропроцессорной системой управления тепловозом стали данные, позволяющие осуществить с помощью выбранного метода пересчет значений тока, протекающего по обмоткам тяговых электродвигателей, в температуру их нагрева.

На основании предложенного алгоритма появляется возможность вывода на дисплей машинисту текущей температуры обмоток, сообщения о превышении нормы нагрева и рекомендации по охлаждению двигателей. Это позволит разработать автоматическую систему защиты по перегреву тяговых электродвигателей, что приведет, в свою очередь, к увеличению максимального веса поезда без последующего отказа электрической машины.

Библиографический список

1. Гребенюк П. Т. Правила тяговых расчетов для поездной работы / П. Т. Гребенюк. – М. : Транспорт, 2016. – 513 с.

2. Деев В. В. Тяга поездов / В. В. Деев. – М. : Транспорт, 1987. – 264 с.

3. Макконнелл Дж. Анализ алгоритмов. Активный обучающий подход / Дж. Макконнелл ; пер. с англ. С. А. Кулешова ; под ред. С. К. Ландо. – М. : Техносфера, 2009. – 415 с.

4. Бабков Ю. В. Автоматизация локомотивов / Ю. В. Бабков, Ф. Ю. Базилевский, А. В. Грищенко. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2007. – 323 с.

5. Осипов А. В. Расчет потерь энергии в элементах тягового привода тепловоза с гидropередачей / А. В. Осипов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2011. – Вып. 3 (28). – С. 211–217.

6. Шрайбер М. А. Моделирование теплового состояния тягового электродвигателя постоянного тока / М. А. Шрайбер // Бюл. результатов науч. исследований. – 2014. – Вып. 4 (13). – С. 36–38.

7. Крылов В. И. Автоматические тормоза подвижного состава / В. И. Крылов, В. В. Крылов. – М. : Транспорт, 1977. – 318 с.

8. Бахолдин В. И. Основы локомотивной тяги / В. И. Бахолдин, Г. С. Афонин, Д. Н. Курилкин. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2014. – 308 с.

9. Сергеев П. С. Проектирование электрических машин / П. С. Сергеев. – М. : Энергия, 1969. – 632 с.

10. Грищенко А. В. Экспериментальные исследования теплового состояния коллектора ТЭД / А. В. Грищенко, В. В. Грачев, Ф. Ю. Базилевский, М. А. Шрайбер // Локомотивы. Электрический транспорт. XXI век : сб. материалов VI Междунар. науч.-технич. конференции. – СПб. : ПГУПС, 2018. – С. 124–129.

Дата поступления: 20.05.2019

Решение о публикации: 30.05.2019

Контактная информация:

ДВОРКИН Павел Вадимович – канд. техн. наук;
pvdvorkin@yandex.ru

КУРИЛКИН Дмитрий Николаевич – канд. техн. наук, доцент; kurilkin_d@mail.ru

The analysis of traction motor thermal condition according to the data of the microprocessor-based locomotive control system

P.V. Dvorkin, D.N. Kurilkin

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

For citation: Dvorkin P.V., Kurilkin D.N. The analysis of traction motor thermal condition according to the data of the microprocessor-based locomotive control system. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 3, pp. 401–409. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-401-409 (In Russian)

Summary

Objective: To analyze the possibility of thermal state control of traction motors using a microprocessor control system of a diesel locomotive. To describe an algorithm for calculating the heating temperature of the windings of traction motors based on the indications of a microprocessor-based diesel locomotive control system. To determine the temperature dependence of the traction motors on the motion and weight profile of the rolling stock. **Methods:** The analysis of faults of traction motors was carried out for the given period of time. The analysis of parameters recorded by the microprocessor-based locomotive control system was performed. The analysis of methods for calculating the heating temperature of traction motor windings, as well as the comparison of the temperature values during traction motor operation and the values calculated by means of the proposed algorithm. **Results:** The available algorithm for calculating the heating temperature of the traction motor windings was obtained, on the basis of which it is possible to display information on the display module about the thermal state of the electric machine, as well as warnings about dangerous operation mode and recommendations for returning it to the normal state. **Practical importance:** The prospect of monitoring thermal state of the traction motor on the basis of indications of the microprocessor-based control system was demonstrated. The former will make it possible to design an automatic traction motor protection system, as well as to change the cooling control method according to the current temperature of the traction motor.

Keywords: Traction electric motor, microprocessor-based diesel locomotive control system, traction electric motor heating, traction calculation, diagnostics of traction electric motor.

References

1. Grebenyuk P.T. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy raboty* [Rules of traction calculations for train work]. Moscow, Transport Publ., 2016, 513 p. (In Russian)
2. Deyev V.V. *Tyaga poyezdov* [Hauling operations]. Moscow, Transport Publ., 1987, 264 p. (In Russian)
3. MacConnell J. *Analiz algoritmov. Aktivniy obuchayushchiy podkhod* [Analysis of algorithms. Active learning approach]. Tr. from Eng. by S.L. Kuleshova; by red. S. K. Lando. Moscow, Tekhnosfera [Technosphere] Publ., 2009, 415 p. (In Russian)
4. Babkov Yu. V., Bazilevskiy F. Yu. & Grishchenko A. V. *Avtomatizatsiya lokomotivov* [Locomotive automation]. Moscow, Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte [Training and methodology center for railway transport] Publ., 2007, 323 p. (In Russian)
5. Osipov A. V. Raschet poter energii v elementakh tyagovogo privoda teplovoza s gidroperedachey [Calculation of energy losses in elements of a diesel locomotive traction drive with the hydrostatic transmission]. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia* [Proceedings of Petersburg State Transport University]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport

University] Publ., 2011, iss. 3(28), pp. 211–217 (In Russian)

6. Shreiber M.A. Modelirovaniye teplovogo sostoyaniya tyagovogo elektrodvigatelya postoyannogo toka [Simulation of thermal state of a direct current traction motor]. *Byulleten rezultatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of research results], 2014, iss. 4 (13), pp. 36–38. (In Russian).

7. Krylov V.I. & Krylov V.V. *Avtomaticheskiye tormoza podvizhnogo sostava* [Automatic brakes of the rolling stock]. Moscow, Transport Publ., 1977, 318 p. (In Russian)

8. Bakholdin V.I., Afonin G.S. & Kurilkin D.N. *Osnovy lokomotivnoy tyagi* [The basics of locomotive traction]. Moscow, Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte [Training and methodology center for railway transport] Publ., 2014, 308 p. (In Russian)

9. Sergeyev P.S. *Proektirovaniye elektricheskikh mashin* [Design of electrical machines]. Moscow, Energiya Publ., 1969, 632 p. (In Russian)

10. Grishchenko A.V., Grachev V.V., Bazilevskiy F.Yu. & Shreiber M.A. Eksperimentalnye issledovaniya teplovogo sostoyaniya kollektora TED [Experimental studies of thermal condition of the traction electric motor collector]. *Sbornik materialov VI mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii “Lokomotivy. Elektricheskiy transport. XXI vek”* [Coll. papers of the 6th International research and training conference “The Locomotive. Electric transport of the 21st century”]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2018, pp. 124–129. (In Russian)

Received: May 20, 2019

Accepted: May 30, 2019

Author’s information:

Pavel V. DVORKIN – Cand. Sci. in Engineering; pvdvorkin@yandex.ru

Dmitriy N. KURILKIN – Cand. Sci. in Engineering, Associate Professor; kurilkin_d@mail.ru

УДК 629

Применение тепловых аккумуляторов на объектах стационарной теплоэнергетики железнодорожного транспорта

И. Г. Киселев¹, Н. С. Кузнецников¹, П. А. Ковалева²

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

² Октябрьская дирекция по тепловодоснабжению – филиал ОАО «РЖД», Центральная дирекция по тепловодоснабжению, Санкт-Петербургский территориальный участок (ДТВУ-3), Российская Федерация, 195009, Санкт-Петербург, ул. Комсомола, 37а

Для цитирования: Киселев И. Г., Кузнецников Н. С., Ковалева П. А. Применение тепловых аккумуляторов на объектах стационарной теплоэнергетики железнодорожного транспорта // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 3. – С. 410–418. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-410-418

Аннотация

Цель: Определение перспективности применения аккумуляторов тепловой энергии на теплопотребляющих объектах железнодорожного транспорта Российской Федерации, поиск возможных объектов внедрения и их характеристик. **Методы:** Используется сравнительный анализ зависимости годовых эксплуатационных затрат от мощности источника тепловой энергии. **Результаты:** Исследуется возможность применения тепловых аккумуляторов в стационарной теплоэнергетике железнодорожного транспорта. Выбраны типовые объекты, на которых возможно внедрить тепловые аккумуляторы. Для типовых объектов произведены расчеты эксплуатационных затрат, капитальных затрат, срока окупаемости и себестоимости отпускаемой тепловой энергии. Построена зависимость изменения годовых затрат от величины присоединенной нагрузки. Установлено, что эффективность применения тепловых аккумуляторов прямо зависит от подсоединенной тепловой нагрузки, при увеличении которой наблюдаются рост эксплуатационных затрат и снижение эффекта от внедрения. Определен предел этой эффективности, зависящий от разности ночного и дневного тарифов на электроэнергию, а также от величины подключенной нагрузки. **Практическая значимость:** На основе полученных зависимостей проводится оценка возможности внедрения тепловых аккумуляторов. Результаты исследования могут быть использованы как при модернизации существующих железнодорожных котельных, так и при проектировании новых.

Ключевые слова: Тепловой аккумулятор, твердотопливные котельные, эффективность применения, снижение эксплуатационных затрат, использование разности тарифов.

Введение

В настоящее время в области генерации тепловой энергии наиболее важной задачей является снижение себестоимости. Также в процессе выработки тепловой энергии воз-

никают проблемы загрязнения окружающей среды.

Российские железные дороги как один из крупнейших потребителей топливно-энергетических ресурсов на территории Российской Федерации постоянно сталкиваются с необхо-

димостью повышения эффективности их потребления. С этой целью и для выравнивания суточных нагрузок на объектах энергетики широкое применение нашли энерготехнологии с использованием тепловых аккумуляторов [1–15].

Структура потребления топливно-энергетических ресурсов объектами стационарной энергетики Октябрьской дирекции по тепловодоснабжению

На железнодорожном транспорте потребители энергоресурсов условно разделены на тяговые и нетяговые. К тяговым относятся энергетические установки электровозов, тепловозов, а также системы их энергоснабжения; к нетяговым – энергетическое оборудование железнодорожных станций, узлов, локомотивных и вагонных депо, компрессорные станции, отопительно-производственные котельные и т. п.

Среди нетяговых потребителей стоит выделить стационарную теплоэнергетику, которая включает в себя паровые и водогрейные котельные установки, системы теплоснабжения

(отопление, горячее водоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха производственных и бытовых зданий) и пр.

Одним из направлений повышения энергетической эффективности и снижения затрат является внедрение энергоэффективных технологий у нетяговых потребителей. Так, на потребление ими котельно-печного топлива приходится более 60% от общего потребления железнодорожным транспортом.

Исходя из данных, предоставленных Октябрьской дирекцией по тепловодоснабжению, 61% всех объектов производства тепловой энергии малой мощности составляют твердотопливные котельные со слоевым сжиганием (32% на пиллетах и 29% на каменном угле). На рис. 1 показано распределение котельных по видам сжигаемого топлива. Лишь 3% тепловой энергии вырабатывается на современных котельных, работающих на природном газе. На рис. 2 представлено распределение потребления условного топлива.

В целях снижения затрат при использовании электро- и твердотопливных котельных, а также для уменьшения выбросов вредных веществ в атмосферу предлагается перейти на иные способы выработки тепловой энергии с использованием тепловых аккумуляторов.

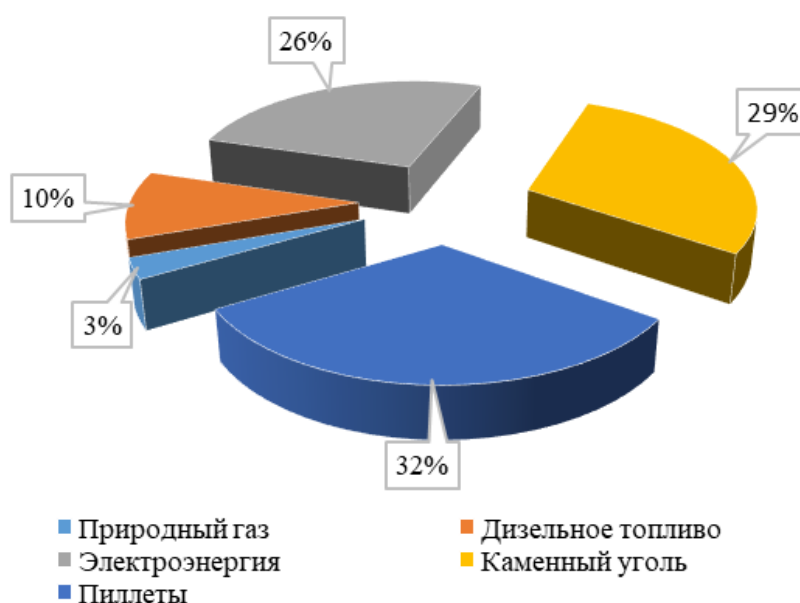


Рис. 1. Распределение котельных по видам сжигаемого топлива на 2017 г.

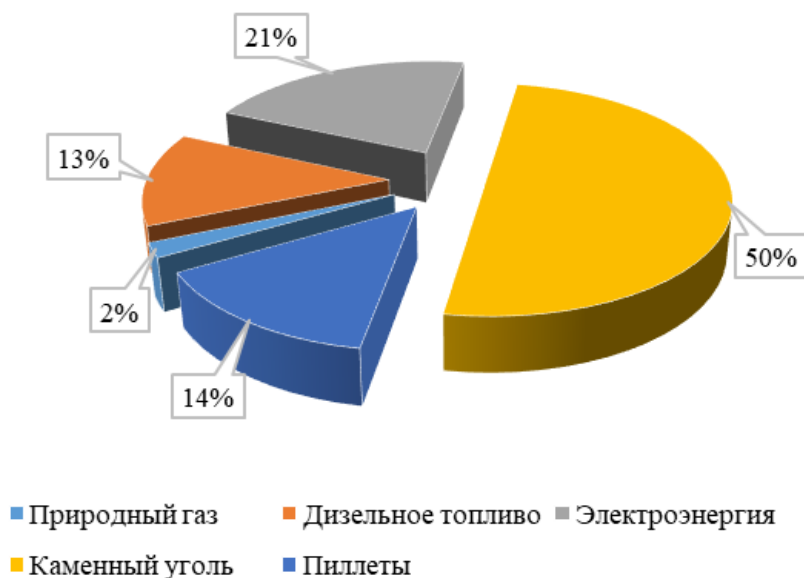


Рис. 2. Распределение потребления условного топлива в 2017 г.

Характеристика объекта внедрения. Схемы теплоснабжения с использованием тепловых аккумуляторов

Наиболее подходящими, с точки зрения использования тепловой аккумуляции, являются объекты, отапливаемые от котельных, работающих на твердом топливе, а также от электрокотельных с тепловой нагрузкой на отопление до 350 кВт. На котельные данной мощности приходится наибольшая себестоимость тепловой энергии ввиду значительных эксплуатационных затрат и небольшой выработки. Перечень котельных и подключенных к ним потребителей представлен в таблице.

Предлагается провести модернизацию электрокотельных и реконструкцию твердотопливных котельных с переводом последних на электрическую энергию с заменой существующих котлов на электродоты с включением в действующую схему теплоснабжения аккумуляторов тепловой энергии.

Основными преимуществами электрических котлов являются:

- 1) высокий коэффициент полезного действия (до 98 %);
- 2) работа в автоматическом режиме;

- 3) простота ремонта;
- 4) экологическая безопасность.

К недостаткам применения электродотов относится высокая стоимость электрической энергии, что может отрицательно повлиять на получаемый экономический эффект. В целях исключения данного фактора на котельной необходимо разместить аккумуляторы тепловой энергии, что позволит включать котлы преимущественно в ночное время суток, когда тариф на используемую электроэнергию значительно ниже. Теплоаккумулирующий материал (ТАМ) теплового аккумулятора набирает тепловую энергию, которую вырабатывают водогрейные электродоты, а затем после полного накопления раздают его в дневное время суток, когда тариф на тепловую энергию выше. С прекращением работы котла помещение начинает охлаждаться. Датчик температуры воздуха (или температуры воды в системе отопления) включает циркуляционный насос, который подает горячую воду из аккумулятора в систему отопления. Температура воздуха (воды) повышается до установленного значения, и датчик выключает насос. Температура воды в аккумуляторе немного уменьшается, но из-за теплоизоляции продолжает оставаться достаточно высокой. Циклы включения и вы-

Перечень котельных и подсоединенных потребителей тепловой энергии

Наименование котельной	Вид топлива	Присоединенная нагрузка, кВт	Себестоимость тепловой энергии, руб./кВт·ч	Годовые затраты, млн руб.	Потребитель тепловой энергии
Ильинская	Каменный уголь	35	8,07	0,905	Станционное здание
Заборье	Электроэнергия	23	15,66	1,058	Пост ЭЦ
Будогощь	Электроэнергия	42	5,73	1,03	Пост ЭЦ, товарная контора, здание ДС
Кадуй	Каменный уголь	140	4,31	2,044	Пост ЭЦ, вокзал, товарная контора, здание ПЧ-33
Пикалево-1	Каменный уголь	326	3,42	1,34	Административно-хозяйственное здание, здание ПТО ВЧД-28

Примечание: Пост ЭЦ – пост электрической централизации, здание ДС – здание дежурного по станции, ПЧ-33 – путевая часть 33, ПТО ВЧД-28 – пункт технического обслуживания вагонной части депо 28.

ключения насоса продолжают до тех пор, пока температура воды в аккумуляторе будет оставаться выше, чем в системе отопления.

Элементарную систему отопления с тепловым аккумулятором иллюстрирует рис. 3. Система представляет собой вертикально расположенный тепловой аккумулятор, к которому подводятся 4 патрубка.

В тепловом аккумуляторе предусмотрены контуры, в обратные магистрали которых мон-

тируются насосы для циркуляции теплоносителя в сети:

– 1-й контур – 2 патрубка, подключенных к источнику тепловой энергии (верхний – прямой, нижний – обратный);

– 2-й контур – 2 патрубка, подключенных к системе отопления (верхний – прямой, нижний – обратный).

Время, требующееся для заполнения теплового аккумулятора, и время работы системы

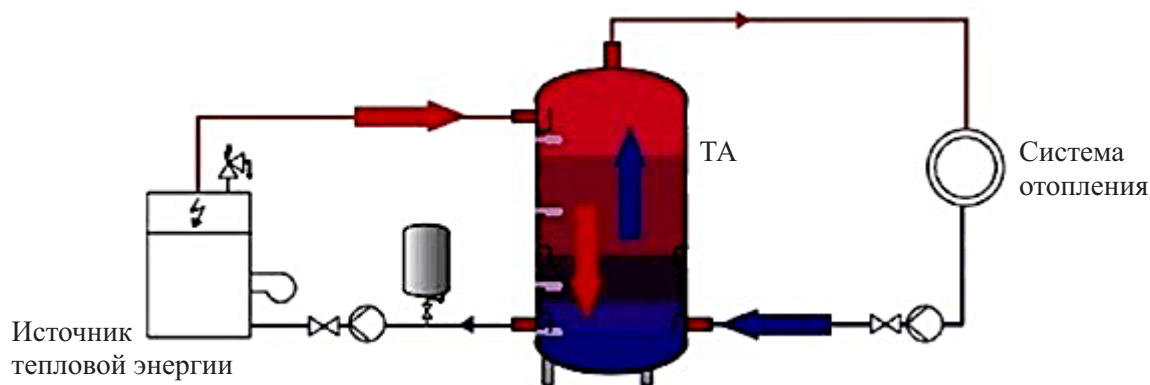


Рис. 3. Система отопления с тепловым аккумулятором (ТА)

на аккумулированной энергии рассчитываются исходя из мощности системы.

Практическое применение различных типов тепловых аккумуляторов связано в первую очередь с определением их оптимальных рабочих характеристик, с выбором недорогих и эффективных конструкционных материалов и теплоаккумулирующих сред.

Эффективность теплового аккумулятора при прочих равных условиях определяется массой и объемом ТАМ, необходимого для обеспечения заданных параметров процесса.

Расчет экономической эффективности от внедрения тепловых аккумуляторов. Расчет капитальных и эксплуатационных затрат

Для расчета были взяты такие данные:

1) расчетная тепловая нагрузка: $Q_0 = 35$ кВт;

2) продолжительность отопительного периода: $n = 220$ сут.;

3) основное оборудование до внедрения – котлы водогрейные: КЧМ-5 – 2011 г.;

4) годовые эксплуатационные затраты до реконструкции: $C_{до} = 905$ тыс. руб.;

5) себестоимость тепловой энергии до внедрения: $S_{до} = 8070$ руб./МВт·ч;

6) основное оборудование после внедрения – электрочотел марки ЭВАН UNIVERSAL 120 с установленной мощностью 120 кВт, две буферные емкости SunSystem P5000 для аккумулирования тепловой энергии объемом 5 м^3 каждая;

7) тарифы на электрическую энергию (включая НДС):

– ночной (23.00–7.00) $Ц_{э.н} = 0,69$ руб./кВт·ч,

– дневной (7.00–23.00) $Ц_{э.д} = 3,75$ руб./кВт·ч.

Расчет выполнялся при допущениях:

– не учитывались изменения цен на топливно-энергетические ресурсы и действующих тарифов;

– капитальные вложения являются единовременными.

Определим количество тепловой энергии в тепловом аккумуляторе, работающем в качестве источника теплоснабжения:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta t = 4,19 \cdot 10\,000 \cdot 40 = 1,676 \text{ ГДж (466 кВт}\cdot\text{ч)},$$

где Q – количество тепловой энергии, необходимое, чтобы нагреть массу жидкости (m) с известной теплоемкостью (c) на определенное количество градусов (Δt). Время работы теплового аккумулятора

$$t = Q/q = 466/35 = 13 \text{ ч,}$$

здесь q – максимальная тепловая нагрузка котельной, кВт.

Таким образом, при пиковой нагрузке заряда теплового аккумулятора будет хватать на 13 ч.

Капитальные вложения составляют

$$K = K_{об} + K_{м} = 1118 + 1118 \cdot 0,2 = 1341,6 \text{ тыс. руб.},$$

где $K_{об}$ – стоимость устанавливаемого оборудования, тыс. руб.; $K_{м}$ – стоимость монтажа оборудования, принимается равной 20% от стоимости оборудования, тыс. руб.

Рассчитаем годовые эксплуатационные затраты по формуле

$$C = C_э + C_{пмз} + C_а,$$

в которой $C_э$ – годовые эксплуатационные расходы, связанные с потреблением электроэнергии:

$$C_э = C_{квт\cdot ч} \cdot Ц_{эл.эн} = 105,881 \cdot 0,69/1000 = 73,058 \text{ тыс. руб.}$$

Здесь $C_{квт\cdot ч}$ – расход электроэнергии на котельной в натуральном выражении, тыс. кВт·ч; $Ц_{эл.эн}$ – тариф на электрическую энергию (принят средний тариф в ночное время для зоны расположения объекта расчета), руб./кВт·ч; $C_{пмз}$ – прочие материальные затраты (аутсор-

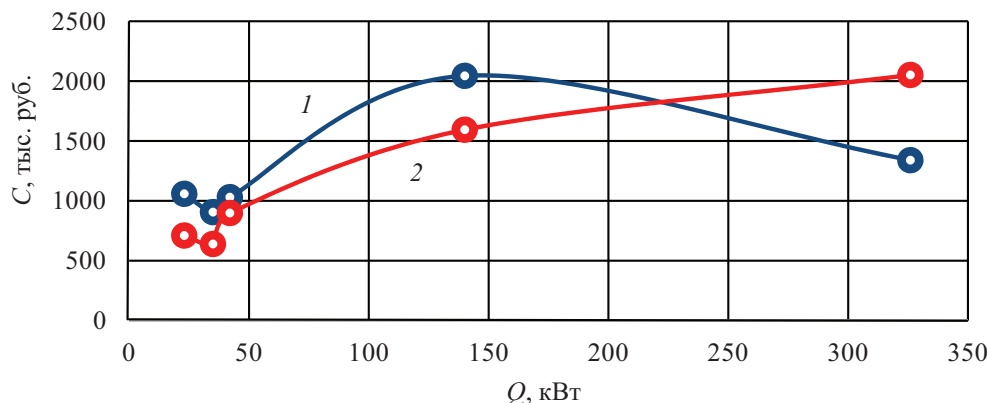


Рис. 4. Зависимость годовых эксплуатационных затрат C от присоединенной тепловой нагрузки: 1 – до внедрения тепловых аккумуляторов; 2 – после внедрения

синг, техническое обслуживание, материалы и др.), принимаются на основании средних материальных затрат на электростанциях Октябрьской дирекции по тепловодоснабжению и составляют 500 тыс. руб.; C_3 – затраты на амортизационные отчисления, тыс. руб.:

$$C_3 = K/T = 1341,6/20 = 67,08 \text{ тыс. руб.},$$

где T – срок полезного использования оборудования, равный 20 годам.

На основании сделанного расчета годовые эксплуатационные затраты составят

$$C = 73,058 + 500 + 67,08 = 640,08 \text{ тыс. руб.}$$

Тогда экономия годовых затрат

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= C_{\text{до}} - C = 905 - 640,08 = \\ &= 264,862 \text{ тыс. руб.}, \end{aligned}$$

здесь $C_{\text{до}}$ – годовые затраты на эксплуатацию котельной до модернизации, тыс. руб.

Срок окупаемости равен

$$A = K/\mathcal{E} = 1341,6/264,862 = 5 \text{ лет.}$$

Себестоимость вырабатываемой тепловой энергии

$$\begin{aligned} S &= C/Q^{\text{год}} = 640,08/112,142 = \\ &= 5,71 \text{ руб./кВт}\cdot\text{ч}, \end{aligned}$$

где $Q^{\text{год}}$ – годовая выработка тепловой энергии, кВт·ч.

Аналогичным образом был проведен расчет для объектов с тепловой мощностью до 350 кВт. Его результаты приведены на рис. 4.

Заключение

Эффективность применения тепловых аккумуляторов зависит от подсоединенной тепловой нагрузки, при увеличении которой наблюдаются рост эксплуатационных затрат и снижение эффекта от внедрения.

В зависимости от разницы дневного и ночного тарифов целесообразно использование тепловых аккумуляторов с подключенной нагрузкой до 200 кВт.

Библиографический список

1. Киселев И. Г. Теплотехника на подвижном составе железных дорог : учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта / И. Г. Киселев. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2008. – 278 с.
2. Куколев М. И. Основы проектирования тепловых накопителей энергии / М. И. Куколев. – Петрозаводск : ПетрГУ, 2001. – 240 с.
3. Левенберг В. Д. Аккумуляирование тепла / В. Д. Левенберг, М. Р. Ткач, В. А. Гольстрем. – Киев : Техника, 1991. – 74 с.

4. Киселев И. Г. Способы и устройства экономии топлива на железнодорожном транспорте / И. Г. Киселев. – СПб. : Изд-во ЛИИЖТ, 1991. – 47 с.
5. Кистьянц Л. К. Экономия топлива на предприятиях железнодорожного транспорта / Л. К. Кистьянц, Е. М. Юдаева. – М. : Транспорт, 1984. – 256 с.
6. Киселев И. Г. Перспективы использования аккумуляторов теплоты в стационарной теплоэнергетике железнодорожного транспорта / И. Г. Киселев, О. Л. Попова // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2004. – Вып. 2. – С. 231–240.
7. Куколев М. И. Расчет процессов заряда и разряда в тепловом накопителе энергии (Ч. I) / М. И. Куколев, Ю. К. Кукелев // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. – Петрозаводск : Изд-во ПетрГУ, 2001. – Вып. 3. – С. 48–51.
8. Куколев М. И. Расчет процессов заряда и разряда в тепловом накопителе энергии (Ч. II) / М. И. Куколев, Ю. К. Кукелев // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. – Петрозаводск : Изд-во ПетрГУ, 2003. – Вып. 4. – С. 68–72.
9. Бекман Г. Тепловое аккумулирование энергии / Г. Бекман ; пер. с англ. В. Я. Сидорова, Е. В. Сидорова ; под ред. В. М. Бродянского. – М. : Мир, 1987. – 271 с.
10. Яковлев Б. В. Повышение эффективности систем теплофикации и теплоснабжения / Б. В. Яковлев. – М. : Новости теплоснабжения, 2008. – 446 с.
11. ГОСТ Р 55656–2013. Энергетические характеристики зданий. Расчет использования энергии для отопления помещений. – М. : Стандартинформ, 2014. – 28 с.
12. Киселев И. Г. Изучение конструкции и процесса зарядки теплового аккумулятора / И. Г. Киселев, Е. В. Комин. – СПб. : ПГУПС, 2007. – 12 с.
13. Алексеев Г. Н. Общая теплотехника / Г. Н. Алексеев. – М. : Высшая школа, 1980. – 552 с.
14. Гулина Н. В. Накопители энергии / Н. В. Гулина. – М. : Наука, 1980. – 152 с.
15. Задвинская Т. О. Методика повышения энергоэффективности типового многоквартирного дома путем внедрения систем учета, автоматизации и регулирования тепловой энергии / Т. О. Задвинская, А. С. Горшков // Строительство уникальных зданий и сооружений (СПб.). – 2014. – № 8 (23). – С. 79–92.

Дата поступления: 22.01.2019

Решение о публикации: 13.02.2019

Контактная информация:

КИСЕЛЕВ Игорь Георгиевич – д-р техн. наук, профессор; kteploteh@pgups.ru

КУЗНЕЧЕНКОВ Николай Сергеевич – ст. преподаватель; ardos911@yandex.ru

КОВАЛЕВА Полина Алексеевна – магистр; polina-kovaleva@mail.ru

The use of heat accumulators at stationary railway heat-power engineering facilities

I. G. Kiselev¹, N. S. Kuznechenkov¹, P. A. Kovaleva²

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

² October management office for heat and water supply – a branch of OAO “Russian Railways” Head management office for heat and water supply, Saint Petersburg territorial district (DTVU-3), bld. 37a, Komsomol ul., Saint Petersburg, 195009, Russian Federation

For citation: Kiselev I. G., Kuznechenkov N. S., Kovaleva P. A. The use of heat accumulators at stationary railway heat-power engineering facilities. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 3, pp. 410–418. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-410-418 (In Russian)

Summary

Objective: To determine the prospects of application of thermal energy accumulators at railway transport heat-consuming facilities of the Russian Federation. To search for possible embedding objects and study their characteristics. **Methods:** Comparative analysis was conducted showing the dependence of total annual operating costs on the capacity of the heat source. **Results:** Applicability of thermal accumulators in stationary heat power engineering of railway transport was investigated. Typical facilities, at which it would be possible to implement thermal batteries, were selected. Calculations of operating costs, capital costs, payback period and the cost of the released thermal energy were carried out for typical facilities. The graph showing the dependence of annual cost changes and the value of the attached load was designed. It was established that the efficiency of using heat accumulators depends directly on the connected heat load. It should be mentioned that together with the increase of connected heat load a rise in operating costs can be seen and lowering of the effect from object embedding. The limit of the efficiency in question was determined, depending on the difference between night and day electricity tariffs, as well as the value of the connected load. **Practical importance:** On the basis of the obtained dependences, the possibility of introducing thermal accumulators is evaluated. The results of the study can be applied both in modernization of the existing railway boilers and in the design of the new ones.

Keywords: Heat accumulator, solid fuel boiler, application efficiency, the reduction of operating costs, the use of tariff variation.

References

1. Kiselev I.G. *Teplotekhnika na podvizhnom sostave zheleznikh dorog* [Thermal technology for the railway rolling stock]. Manual for universities of railroad transport. Moscow, Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte [Training and methodology center for railway transport] Publ., 2008, 278 p. (In Russian)
2. Kukolev M.I. *Osnovy proektirovaniya teplovykh nakopiteley energii* [Heat energy storage units: engineering foundations]. Petrozavodsk, PetrGU [Petrozavodsk State University] Publ., 2001, 240 p. (In Russian)
3. Levenberg V.D., Tkach M.R. & Golstrem V.A. *Akkumulirovaniye tepla* [Heat storage]. Kiev, Tekhnika Publ., 1991, 74 p. (In Russian)
4. Kiselev I.G. *Sposoby i ustroystva ekonomii topliva na zheleznodorozhnom transporte* [Methods and facilities for fuel economy on railway transport]. Leningrad, LIIZhT [Leningrad State Transport University] Publ., 1991, 47 p. (In Russian)
5. Kistyantz L.K. & Yudaeva E.M. *Ekonomiya topliva na predpriyatiyakh zheleznodorozhnoy transporta* [Fuel economy at railway enterprises]. Moscow, Transport Publ., 1984, 256 p. (In Russian)
6. Kiselev I.G. & Popova O.L. *Perspektivy ispolzovaniya akkumulyatorov teploty v statsionarnoy teploenergetike zheleznodorozhnoy transporta* [Application prospects for heat accumulators in stationary railway heat-power engineering]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg State University]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2004, iss. 2, pp. 231–240. (In Russian)
7. Kukolev M.I. & Kukelev Yu.K. *Raschet protsessov zaryada i razryada v teplovom nakopiteley energii* (Ch. 1) [Calculation of charging and discharging processes in the heat energy storage unit (Pt 1)]. *Trudy lesoinzhenernogo fakulteta PetrGU* [Proceedings of PetrGU Forest Engineering faculty]. Petrozavodsk, PetrGU [Petrozavodsk State University] Publ., 2001, iss. 3, pp. 48–51. (In Russian)
8. Kukolev M.I. & Kukelev Yu.K. *Raschet protsessov zaryada i razryada v teplovom nakopiteley energii* (Ch. 2) [Calculation of charging and discharging processes in the heat energy storage unit (Pt 2)]. *Trudy lesoinzhenernogo fakulteta PetrGU* [Proceedings of PetrGU Forest Engineering faculty]. Petrozavodsk, PetrGU [Petrozavodsk State University] Publ., 2003, iss. 4, pp. 68–72. (In Russian)
9. Beckmann G. *Teplovoye akkumulirovaniye energii* [Thermal energy storage]. Tr. from Eng. V. Ya. Sidorova, E. V. Sidorova; by red. V.M. Brodyanskiy. Moscow, Mir Publ., 1987, 271 p. (In Russian)

10. Yakovlev B. V. *Povysheniye effektivnosti sistem teplofikatsii i teplosnabzheniya [Improvement of efficiency in district heating cogeneration and heat supply]*. Moscow, Novosty teplosnabzheniya [Heating supply bulletin] Publ., 2008, 446 p. (In Russian)
11. GOST R 55656–2013. *Energeticheskiye kharakteristiki zdaniy. Raschet ispolzovaniya energii dlya otopeniya pomeshcheniy [Energy performance of buildings. The analysis of energy use for heating buildings]*. Moscow, Standartinform Publ., 2014, 28 p. (In Russian)
12. Kiselev I. G. & Komin E. V. *Izucheniye konstruktivnykh i protsessnykh zadach teplovogo akkumulyatora [The study of charging process and design of a heat accumulator]*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2007, 12 p. (In Russian)
13. Alekseyev G. N. *Obshchaya teplotekhnika [General thermal engineering]*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1980, 552 p. (In Russian)
14. Gulina N. V. *Nakopitelnyye energii [Energy storage units]*. Moscow, Nauka Publ., 1980, 552 p. (In Russian)
15. Zadvinskaya T. O & Gorshkov A. S. *Metodika povysheniya energoeffektivnosti tipovogo mnogo-kvartirnogo doma putem vnedreniya sistem ucheta, avtomatizatsii i regulirovaniya teplovoy energii [Energy efficiency improvement method for a block of flats by introducing heat energy accounting, automation and control]*. *Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy [Construction of unique buildings and structures]* (Saint Petersburg), 2014, no. 8 (23), pp. 79–92. (In Russian)

Received: January 22, 2019

Accepted: February 13, 2019

Author's information:

Igor G. KISELEV – D. Sci. in Engineering, Professor; kteploteh@pgups.ru

Nikolay S. KUZNECHENKOV – Senior Lecturer; ardos911@yandex.ru

Polina A. KOVALEVA – Master; polina-kovaleva@mail.ru

УДК 656.212.3

Обоснование строительства дополнительных путей на станциях для отстоя на них избытка порожних вагонов или отставленных от движения составов поездов

Н. С. Комовкина, Л. А. Половинко, А. Ю. Попадюк

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

Для цитирования: Комовкина Н. С., Половинко Л. А., Попадюк А. Ю. Обоснование строительства дополнительных путей на станциях для отстоя на них избытка порожних вагонов или отставленных от движения составов поездов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 3. – С. 419–426. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-419-426

Аннотация

Цель: Определение условий использования вагонного парка ОАО «РЖД» для устройства дополнительных путей на станциях. **Методы:** Применен анализ использования вагонного парка на сети железных дорог, в том числе порожнего подвижного состава. **Результаты:** Представлены причины отставления от движения составов поездов. Проведен анализ статистических данных времени занятия путей станций отставленными от движения составами поездов, расстояния удаления станций отставления от движения до станций назначения, количества вагонов в составах. На основании собранных статистических данных рассчитаны средние затраты ОАО «РЖД» на отставление от движения одного поезда, общие годовые затраты и внесены предложения по их снижению. Приведен расчет затрат на заземление электрического тока на приемоотправочных путях, на которых осуществляется простой составов поездов. Установлена зависимость затрат на отставление от движения одного поезда более чем на 72 ч в зависимости от удаленности станции «бросания» от станции формирования. Рассмотрены варианты устройства дополнительных путей или отдельных парков для размещения отставленных от движения составов поездов, рассчитано оптимальное количество путей при разных показателях количества отставленных от движения составов поездов и продолжительности их нахождения на путях. Также определена суммарная ежегодная экономия затрат ОАО «РЖД» по станции для рассчитанного количества отставленных от движения составов поездов. Сопоставлены годовые расходы на строительство дополнительных путей на станции и экономия затрат ОАО «РЖД» при отставлении от движения поездов на этих путях. **Практическая значимость:** Выявлены показатели, при которых целесообразно устройство дополнительных путей на станции для размещения на них составов поездов.

Ключевые слова: Отставленные от движения поезда, затраты ОАО «РЖД», строительство путей на станциях, железнодорожные станции, порожние вагоны.

В последние годы на сети железных дорог имеет место сильная диспропорция вагонного парка по роду подвижного состава. В 2017 г., с одной стороны, наблюдалась нехватка полувагонов «для перевозки низкодоходных грузов» [1], полувагонов для перевозки щебня и вагонов-зерновозов. С другой стороны, имеет место избыток вагонов, перевозящих более

доходные грузы, к примеру, цистерн под налив нефтепродуктов.

Порожние вагоны отстаиваются на путях железнодорожных станций, и в соответствии с «Распоряжением ОАО «РЖД» от 13 июля 2016 г. № 1400р» [2] собственники подвижного состава вносят плату за нахождение вагонов «на инфраструктуре железнодорожного транс-

порта общего пользования», ОАО «РЖД» получает доход от их простоя. Основываясь на статистических данных за 2017–2018 гг., по причине оказания «в пути следования услуг по временному размещению собственного (арендованного) подвижного состава на железнодорожных путях общего пользования» наибольшее число простаиваемых составов поездов (до 16 поездов в сутки) приходилось на Горьковскую, Дальневосточную и Северо-Кавказскую железные дороги.

Избыток порожних вагонов, длительное время занимающих пути железнодорожных станций, ведет к снижению перерабатывающих способностей этих станций. Также пути станций занимают отставленные от движения составы поездов порожних вагонов¹. В особенности это касается припортовых железнодорожных узлов и железнодорожных узлов, в состав которых входят крупные грузовые специализированные станции. Такая ситуация появляется в связи с отсутствием согласованности подачи вагонов под погрузку, из-за низких мощностей перегрузочных устройств, нехватки складских площадей [3–5].

Одним из способов сокращения затрат, связанных с «брошенными» поездами, принято считать укладку дополнительных путей или устройство отдельных парков на станциях для отстоя на них как составов «брошенных» поездов, так и избытка порожних вагонов [3, 6, 7].

Однако реконструкция путевого развития станции требует значительных капитальных вложений. Для размещения дополнительных путей и парков необходимо наличие свободной территории, потому для их строительства нужно обоснование. В связи с этим следует рассмотреть случаи, при которых целесообразно строительство дополнительных путей или отдельных парков на станциях для отстоя

на них как составов «брошенных» поездов, так и избытка порожних вагонов.

Проанализируем размеры убытка, которые несет ОАО «РЖД» на отставление «брошенных» поездов, и сопоставим их с затратами на устройство потребного количества железнодорожных путей.

В качестве примеров при сборе статистических данных рассмотрены станция Зелецино Горьковской железной дороги (ГЖД), станции Автово и Новый Порт Октябрьской железной дороги (ОЖД). Для вышеуказанных отдельных пунктов был произведен анализ расстояния перепробега поездов для каждой станции «бросания».

По ГЖД для станции Зелецино за рассмотренный период было отставлено от движения 204 состава, расстояния перепробега которых варьируются в диапазоне 3–625 км (станции Костариха и Яр соответственно) [6]. Расстояния перепробега рассчитаны исходя из условия отправления порожних составов, сформированных на станции Нижний Новгород-Сортировочный и не принятых станцией Зелецино, до станции бросания. В дальнейшем при подъеме «брошенный» поезд отправляется на станцию Нижний Новгород-Сортировочный, где при необходимости осуществляются его переформирование и проследование до станции Зелецино.

По ОЖД для станций Автово и Новый Порт расстояния перепробега варьируются в диапазоне от 2 до 179 км (станции Купчинская и Валя соответственно). Для расчета принят немаршрутизированный вагонопоток при формировании на сортировочных станциях Санкт-Петербург-Сортировочный–Московский и Шушары [7].

Расчеты затрат на перепробег поездов до станций «бросания» и на следование одиночного локомотива до ближайшего депо и обратно проведен с использованием программного продукта MS Excel с учетом ставок пробега поездов и одиночного локомотива в соответствии с расходными ставками ОАО «РЖД». Таким образом, средние затраты на перепробег 200 поездов составляют 145 млн руб.,

¹ В соответствии с собранными статистическими данными количество порожних составов поездов составляет порядка 35% от общего числа отставленных от движения составов поездов за 2018 г.

а на одиночные пробеги поездных локомотивов до ближайшего локомотивного депо – 11 млн руб.

Кроме того, во избежание травмирования людей следует осуществлять заземление электрического тока на приемоотправочных путях, на которых производится отстой «брошенных» поездов. Для того чтобы отключить электропитание и произвести их заземление, необходима бригада, в состав которой должны входить: руководитель-механик 7-го разряда, два монтера 5-го разряда, машинист 10-го разряда, помощник машиниста 7-го разряда. На семи из представленных в таблице станций в штате указанные сотрудники не числятся и бригада вызывается с ближайшей станции. Доставка работников осуществляется посредством автомотрисы. Таким образом, затраты на заземление можно представить как суммарные затраты на пробег автомотрисы и заработной платы бригады. Ниже приведен пример расчета заработной платы руководителя-механика 7-го разряда.

Продолжительность работы в средний месяц можно определить следующим образом:

$$M_{\text{нч}} = \Sigma Z \cdot T_3,$$

где ΣZ – суммарное количество заземлений на станциях в среднем в месяц; T_3 – среднее количество часов, необходимое на заземление.

Затраты на использование автомотрисы, приходящиеся на одно заземление:

$$Z_{\text{р}}^{\text{ам}} = \Pi_{\text{дт}} (2 \cdot t_{\text{пр}}^{\text{ам}} \cdot P_{\text{дт}}^{\text{рх}} + t_{\text{хх}}^{\text{ам}} \cdot P_{\text{дт}}^{\text{хх}}),$$

здесь $t_{\text{пр}}^{\text{ам}}$ – время на пробег автомотрисы до станции «бросания», которое складывается из времени на пробег автомотрисы и ее работы в режиме рабочего хода на станции; $t_{\text{хх}}^{\text{ам}}$ – время холостого хода автомотрисы при заземлении одного пути, принимается; $P_{\text{дт}}^{\text{рх}}$ – расход топлива на рабочий ход; $P_{\text{дт}}^{\text{хх}}$ – расход топлива на холостой ход; $\Pi_{\text{дт}}$ – средняя оптовая цена дизельного топлива за литр.

В результате расчета выявлено, что средние суммарные затраты на заземление составили

2,5 млн руб. в год, а суммарные расходы ОАО «РЖД» на «бросание» 200 поездов на удаленных станциях – порядка 158,5 млн руб.

В связи с тем, что расстояния удаления станций «бросания» от станции формирования варьируются в широком диапазоне, было проведено исследование влияния удаленности станции «бросания» на величину затрат ОАО «РЖД», приходящихся на отставление от движения одного поезда. На рис. 1 представлен график, демонстрирующий рост таких затрат в зависимости от удаленности станции «бросания» от станции формирования. При составлении графика учтены затраты на пробег одного поезда от станции формирования до станции «бросания», затраты на заземление и на пробеги одиночных локомотивов до депо. Время простоя состава принято равным более 72 ч.

На рис. 1 виден более существенный рост затрат на отставление от движения поездов при их «бросании» на станции, расстояние до которой от станции формирования превышает 50 км.

С целью сокращения затрат перевозчика рассмотрены варианты строительства дополнительных путей или отдельных парков на территории близлежащих станций для размещения на них отставленных от движения поездов.

Для определения потребного количества путей по вариантам предлагается формула, основанная на существующем аналитическом методе расчета числа путей приемоотправочных парков по суммарной суточной загрузке с учетом коэффициента неравномерности [3]:

$$m = \frac{n_{\text{ср}} \cdot q_{\text{нпр}} \cdot 60 t_{\text{ср}}^{\text{прост}}}{30(1440 - t_{\text{нпр}})},$$

где $n_{\text{ср}}$ – среднее количество «брошенных» поездов в месяц; $q_{\text{нпр}}$ – коэффициент внутримесячной неравномерности поступления поездов в парк, $q_{\text{нпр}} = 1,5$; 30 – среднее количество дней в месяц; 1440 – количество минут в сутки; $t_{\text{ср}}^{\text{прост}}$ – среднее время простоя «брошенного»

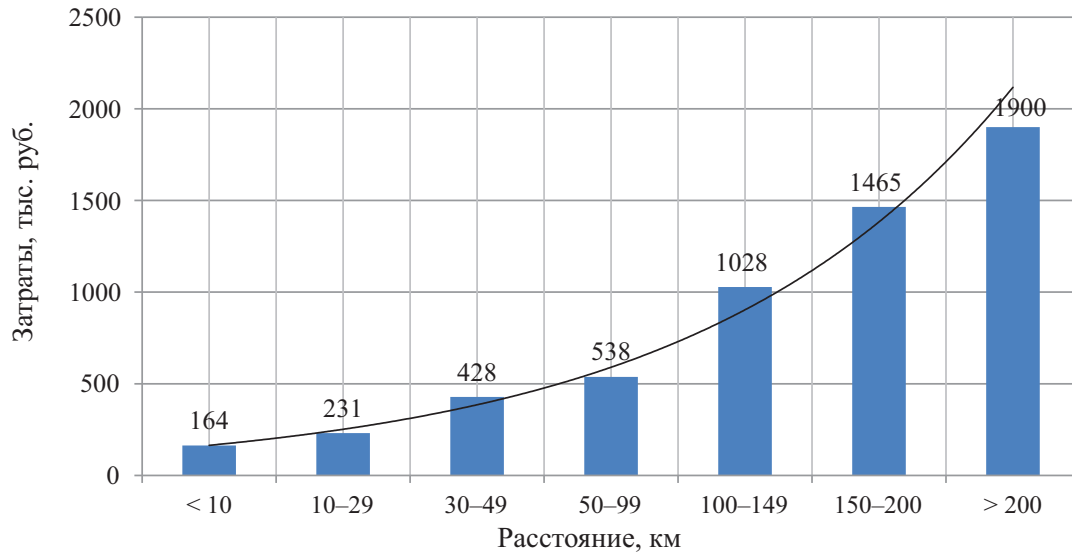


Рис. 1. Рост затрат на отставление от движения одного поезда более чем на 72 ч в зависимости от удаленности станции «бросания» от станции формирования

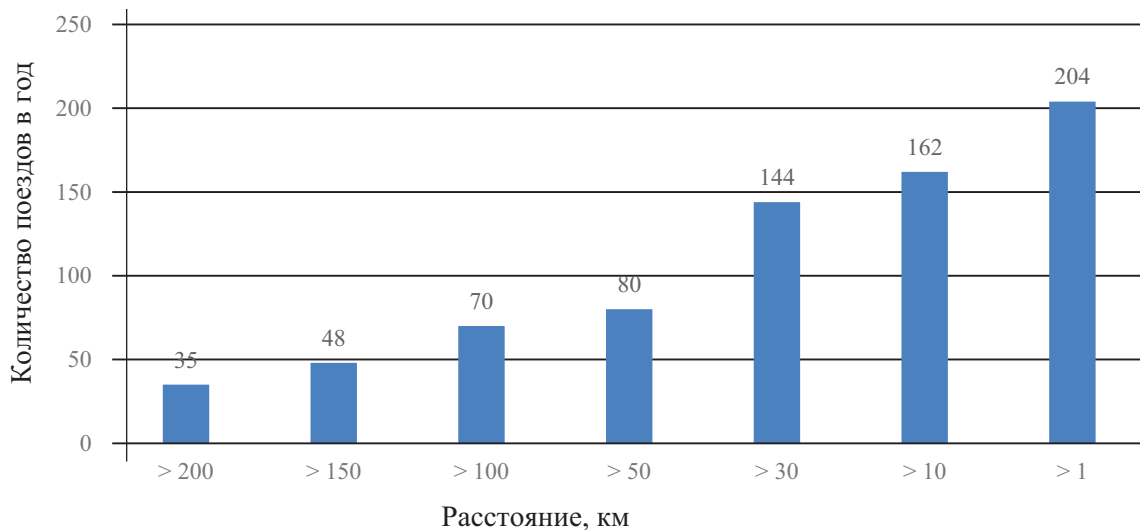


Рис. 2. Прирост среднемесячного количества отставленных от движения поездов в зависимости от удаления от станции назначения станции «бросания»

поезда за год, ϵ – переводной коэффициент; $t_{\text{пер}}$ – среднее время на прочие операции, мин, $t_{\text{пер}} = 120$ мин.

Исходя из статистических данных, в 2017 г. средний простой «брошенного» поезда назначением на станцию Зелецино составил 282 ч, для станции Новый Порт – 258 ч.

В качестве примера рассмотрим возможность размещения дополнительных путей под «брошенные» поезда на станции Зелецино ГЖД [8, 9]. Для дальнейшего расчета построен

график прироста среднемесячного количества отставленных от движения поездов в зависимости от удаления от станции назначения к станции «бросания» (рис. 2).

Для рассчитанного количества поездов определены необходимое дополнительное путевое развитие на станции Зелецино, капитальные вложения в строительство необходимой инфраструктуры, эксплуатационные расходы на ее содержание и приведенные расходы (см. таблицу).

**Затраты на строительство потребного количества путей на отставление
от движения составов поездов**

Расстояние удаления станции «бросания» от станции назначения, км	Количество отставленных от движения поездов в год	Потребное количество путей	Капитальные вложения, тыс. руб.	Эксплуатационные затраты, тыс. руб.	Приведенные расходы, млн руб.
> 200	35	2	51 206	3173	9,3
> 150	48	3	65 350	4231	12,1
> 100	70	4	82 342	5229	15,1
> 50	80	5	101 688	6346	18,5
> 30	144	8	148 509	9550	27,4
> 10	162	9	182 152	11 120	33,0
> 1	204	11	215 360	13 260	39,1

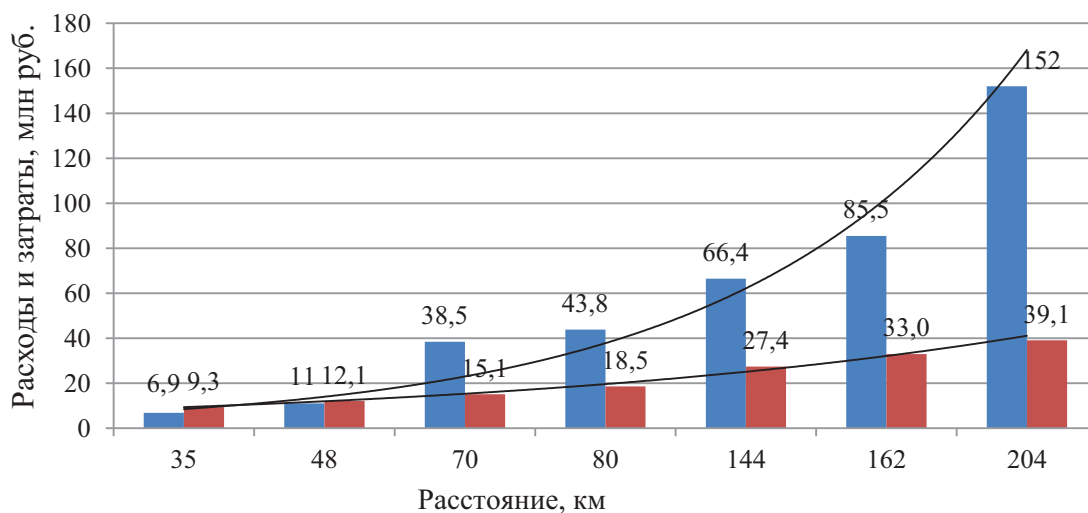


Рис. 3. Сопоставление приведенных годовых расходов на строительство дополнительных путей на станции и экономии затрат ОАО «РЖД» при «бросании» поездов на этих путях:
■ – приведенные годовые расходы; ■ – экономия затрат

На рис. 3 представлено сопоставление приведенных годовых расходов на строительство дополнительных путей на станции и экономии затрат ОАО «РЖД» для рассчитанного количества отставленных от движения составов поездов в соответствии с рис. 2 при их «бросании» на этих путях.

Видно, что при проектировании парков для отстоя «брошенных» поездов при укладке от 4 до 11 путей приведенные расходы на строительство и содержание этих путей существенно ниже потенциальной выгоды от отсутствия необходимости вытягивать такие поезда на пути станций узла. В соответствии

с таблицей при наличии в парке станции от 4 до 11 путей на них возможно разместить от 70 до 204 отставленных от движения составов поездов в год.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1) занятие путей под отстой излишних вагонов ведет к снижению перерабатывающей способности станций, что приводит к усугублению ситуации с отставлением от движения поездов по причине «занятости станционных путей вагонами нерабочего парка». При этом отстой порожних вагонов собственников на путях общего пользования приносит доход ОАО «РЖД», в связи с чем отставление вагонов на специально выделенные пути отстоя или парки является целесообразным для компании;

2) затраты на бросание поездов значительно увеличиваются при их вытягивании на расстояние свыше 50 км;

3) определено количество путей в парке, которое позволило бы принять наиболее «затратные» отставленные от движения поезда, а также излишние вагоны. Целесообразным является проектирование парков с укладкой более 4 путей;

4) строительство отдельного парка на станции необходимо при наличии в ее адрес более 70 «брошенных» поездов в год. При меньшем числе поездов потенциальная экономия затрат не покрывает расходы на укладку дополнительных путей.

Библиографический список

1. Маринин В. РЖД допустили риск повторения дефицита полувагонов / В. Маринин. – URL : <https://www.rbc.ru/business/06/06/2018/5b17bbc99a7947e6be177dae> (дата обращения : 10.05.2019).

2. Распоряжение ОАО «РЖД» № 1400р «Об утверждении Технологии автоматизированного начисления платы за нахождение вагонов на инфраструктуре железнодорожного транспорта общего пользования» от 13 июля 2016 г. – URL : <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71387858/#ixzz5VWsrXTP8> (дата обращения : 10.05.2019).

3. Кожевников А. А. Создание станций отстоя на основе частно-государственного сотрудничества, как один из путей решения вопроса регулирования вагонопотоков / А. А. Кожевников, О. А. Нестеренко // Молодой ученый. – 2014. – № 7. – С. 127–129.

4. Новиков П. О. Разработка технологии временного отставления от движения и подъема грузовых поездов / П. О. Новиков. – М. : Моск. гос. ун-т путей сообщения, 2014. – 133 с.

5. Определение эксплуатационных расходов по укрупненным расходным ставкам при сравнении вариантов развития железнодорожных станций и узлов : методические указания к курсовому и дипломному проектированию / под ред. С. И. Логинова и др. – СПб. : ПГУПС, 2009. – 19 с.

6. Половинко Л. А. Взаимодействие станции Зеленино Горьковской железной дороги с путями необщего пользования / Л. А. Половинко, Н. С. Комовкина // Транспорт : проблемы, идеи, перспективы : сб. трудов LXXVIII Всерос. науч.-технич. конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб. : ПГУПС, 2018. – С. 269–273.

7. Рыбин П. К. Анализ структуры поездопотоков и вагонопотоков, поступающих в адрес российских портов Финского залива / П. К. Рыбин, Н. В. Ершиков, Н. С. Комовкина, Д. В. Путилина // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2018. – Т. 15, вып. 3. – С. 478–486.

8. Ефименко Ю. И. Масштабное проектирование путевого развития железнодорожных станций : учеб. пособие / Ю. И. Ефименко, В. С. Суходоев, М. В. Губарь и др. – СПб. : ПГУПС, 2010. – 62 с.

9. Определение ориентировочной стоимости строительства железнодорожных станций и узлов по укрупненным показателям : метод. указания / Сост. А. А. Краснощек, С. И. Логинов, Ю. И. Ефименко, М. В. Четчуев. – СПб. : ПГУПС, 2016. – 31 с.

Дата поступления: 13.05.2019

Решение о публикации: 24.05.2019

Контактная информация:

КОМОВКИНА Наталия Сергеевна – канд. техн. наук, доцент; nkomovkina@gmail.com

ПОЛОВИНКО Леонид Александрович – студент; otes90@gmail.com

ПОПАДЮК Антон Юрьевич – аспирант; antonpopadyuk1997@yandex.ru

Justification of auxiliary staging tracks construction at stations for empty cars or train sets dismissed from operation

N. S. Komovkina, L. A. Polovinko, A. Yu. Popadyuk

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

For citation: Komovkina N. S., Polovinko L. A., Popadyuk A. Yu. Justification of auxiliary staging tracks construction at stations for empty cars or train sets dismissed from operation. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 3, pp. 419–426. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-419-426 (In Russian)

Summary

Objective: To analyze car fleet availability for railway networks including empty rolling stock. **Methods:** The analysis of reasons for operation dismissal of train sets was carried out. The statistical data analysis of the time spent by dismissed train sets occupying the station tracks, as well as the distance between the station for dismissed trains to the receiving station and the number of cars in train sets was fulfilled. **Results:** On the basis of statistical data, the average costs of OAO “Russian Railways” on operation of one train as well as the total annual costs dismissal were calculated. Proposals on the reduction of the costs in question were submitted. Calculation of costs on grounding of the electrical current at receiving and departure tracks, at which the yard time of train sets takes place, was presented. The dependence diagram of costs on operation dismissal of one train for more than 72 hours was given depending on the distance between the station for dismissed trains and the receiving station. Arrangement variants for auxiliary tracks or separate storage yards for dismissed train sets were studied. An optimum number of tracks was estimated according to different quantity indices of dismissed train sets and their yard time. The total annual cost savings of OAO “Russian Railways” was determined for the estimated number of dismissed train sets at the station. **Practical importance:** The comparison of the given annual costs on construction of auxiliary tracks at the station makes it possible to demonstrate cost savings of OAO “Russian Railways” in case of train dismissal at these tracks. The conditions which presuppose the construction of auxiliary tracks for dismissed trains at the station were determined.

Keywords: Operation dismissal of a train, expenses of OAO “Russian Railways”, construction of tracks at stations, railway stations, empty cars.

References

1. Marinin V. *RZhD dopustily risk povtoreniya defitsita poluvagonov [Russian Railways tolerate risk of deficit recurrence for open box cars]*. Available at: <https://www.rbc.ru/business/06/06/2018/5b17bbc99a7947e6be177dae> (accessed : 10.05.2019). (In Russian)

2. *Rasporyazheniye OAO “RZhD” no. 1400r “Ob utverzhdenii Tekhnologii avtomatizirovannogo nachisleniya platy za nakhozheniye vagonov na infrastrukturu zheleznodorozhnogo transporta obshchego polzovaniya” ot 13 iyulya 2016 [OAO “RZhD” order N 1400r “On the approval of computer-aided fee charge technology for the time spent by cars in*

public railway transport infrastructure” dated July 13, 2016]. Available at: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71387858/#ixzz5VWsrXTP8> (accessed: 10.05.2019). (In Russian)

3. Kozhevnikov A.A. & Nesterenko O.A. *Sozdaniye stantsiy otstoya na osnove chastno-gosudarsvennogo sotrudnichestva, kak odin iz putey resheniya voprosa regulirovaniya vagonopotokov [The construction of stations with staging tracks based on public-private partnership, as a solution to the problem of car traffic volume regulation]*. *Molodoy ucheniy [Young scholar]*, 2014, no. 7, pp. 127–129. (In Russian)

4. Novikov P.O. *Razrabotka tekhnologii vremennogo otstavleniya ot dvizheniya i podyema gruzovykh*

poezdov [Process engineering of temporary dismissal from operation and lifting of freight trains]. Moscow, MGUPS [Moscow State University of Railway Engineering] Publ., 2014, 133 p. (In Russian)

5. Loginov S. I. et al. *Opredeleyeniye ekspluatatsionnykh raskhodov po ukрупnennym raschetnym stavkam pry sravnenii variantov razvitiya zheleznodorozhnykh stantsiy i uzlov. Metodicheskiye ukazaniya k kursovomu i diplomnomu proektirovaniyu [Determination of operating costs by aggregate settlement costs while comparing development variants of railway stations and junctions. Guidelines on course and diploma design-based research].* Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2009, 19 p. (In Russian)

6. Polovinko L. A. & Komovkina N. S. *Vzaimodeistviye stantsii Zeletsino Gorkovskoy zheleznoy dorogi s putyamy neobshchego polzovaniya [Interaction of the Gorky Railway Zeletsino station with non-public railway lines].* *Transport: problem, idei, perspektivy. Sbornik trudov LXXVIII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh [Transport: problems, ideas, prospects. Coll. Papers of the LXXVIII All-Russian research and training conference of students, postgraduates and young scholars].* Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2018, pp. 269–273. (In Russian)

7. Rybin P. K., Yershikov N. V., Komovkina N. S. & Putilina D. V. *Analiz struktury poezdopotokov i vagonopotokov, postupayushchikh v adres rossiyskikh portov Finskogo zaliva [Structure analysis of the train and*

car traffic volume entering the Russian ports of the Gulf of Finland]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya [Proceedings of Petersburg State University].* Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2018, vol. 15, iss. 3, pp. 478–486. (In Russian)

8. Efimenko Yu. I., Sukhdoyev V. S., Gubar M. V. et al. *Masshtabnoye proektirovaniye putevogo razvitiya zheleznodorozhnykh stantsiy. Uchebnoye posobiye [Large-scale design of track development at railway stations. Teaching aid].* Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2010, 62 p. (In Russian)

9. *Opredeleyeniye orientirovochnoy stoimosti stroitelstva zheleznodorozhnykh stantsiy i uzlov po ukрупnennym pokazatelyam [Aggregate-based assessment of estimated cost of railway stations and junctions].* Guidelines. Comp. by A. A. Krasnoshchek, S. I. Loginov, Yu. I. Efimenko & M. V. Chetchuyev. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2016, 31 p. (In Russian)

Received: May 13, 2019

Accepted: May 24, 2019

Author's information:

Natalia S. KOMOVKINA – Cand. Sci. in Engineering, Associate Professor; nkomovkina@gmail.com

Leonid A. POLOVINKO – Student; otes90@gmail.com

Anton Yu. POPADYUK – Postgraduate Student; antonpopadyuk1997@yandex.ru

УДК 681.786.5, 629.44

Лазерный профилометр поверхности катания как универсальное средство измерения профиля колесной пары при тревожных показаниях комплекса технических измерений

Л. В. Мартыненко, Н. Ю. Соснов

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

Для цитирования: Мартыненко Л. В., Соснов Н. Ю. Лазерный профилометр поверхности катания как универсальное средство измерения профиля колесной пары при тревожных показаниях комплекса технических измерений // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 3. – С. 427–438. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-427-438

Аннотация

Цель: Проанализировать работу комплекса технических измерений на Восточно-Сибирской железной дороге и его влияние на работу пунктов технического обслуживания с практикой применения лазерного профилометра поверхности катания колесных пар. **Методы:** Проведены анализы основных неисправностей вагонов, возникающих в процессе эксплуатации на Восточно-Сибирской железной дороге, в ходе которого представлена номенклатура распределения неисправностей вагонов по основным несущим узлам, а также анализ дефектов колесных пар, образовавшихся в процессе эксплуатации на этой дороге за период 2016–2019 гг. Индуктивным методом выявлено влияние работы комплекса технических измерений на возникновение технологических нарушений и задержек поездов на станциях формирования. Экспериментально подтверждена теория о снижении времени на обработку поездов при проведении контрольных замеров лазерным профилометром. В ходе эксперимента на производстве проанализированы данные, полученные при измерении различных профилей поверхности катания грузовых вагонов, включая колесные пары с дефектами в сравнении с эталонным профилем. **Результаты:** Выделены значимые недостатки работы комплекса технических измерений в эксплуатации на Восточно-Сибирской железной дороге, влияющие на пропускную способность станций и пунктов технического обслуживания. Выявлена основная проблема досрочной постановки вагонов в ремонт по неисправностям поверхности катания колесных пар. Предложен вариант внедрения на производство лазерного профилометра для измерения поверхности катания колесных пар с целью сокращения времени обработки транзитных поездов на станциях формирования. Рассмотрены основные преимущества лазерного профилометра поверхности катания колесных пар для последующего внедрения в эксплуатацию. **Практическая значимость:** Внесено предложение по внедрению в эксплуатацию лазерного профилометра на станциях обработки и формирования подвижного состава, вблизи которых установлен комплекс технических измерений, с целью сокращения времени на проведение контрольных замеров в результате тревожных и предварительных показаний аппаратуры.

Ключевые слова: Железная дорога, железнодорожный транспорт, подвижной состав, вагон, колесная пара, лазерный профилометр, дефекты поверхности катания, комплекс технических измерений, статистика отказов, неисправности колесных пар, неисправности вагонов, подвижной состав, система «колесо–рельс».

В последнее время все чаще отмечают низкое качество эксплуатируемого подвижного состава. Но все же не стоит отрицать того, что с 2007 г. идет активное обновление парка подвижного состава новыми инновационными вагонами [1]. Несмотря на это, в настоящее время в эксплуатации находится значительное количество устаревших моделей вагонов, за которыми необходимы тщательный контроль и диагностика технического состояния для должного обеспечения безопасности движения на сети железных дорог Российской Федерации [2].

Таким образом, следуя Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года [3], производятся обновление и внедрение новых систем и устройств для повышения результатов в области обеспечения безопасности движения подвижного состава. Проводится введение новых технологий по обслуживанию и ремонту парка грузовых вагонов для получения удовлетворительных показателей перевозочного процесса с целью уменьшения сроков доставки грузов и обеспечения их сохранности [3].

С 2016 по 2019 г. на Восточно-Сибирской железной дороге наблюдается рост отцепок ва-

гонов в связи с некачественным ремонтом как подвижного состава, так и рельсового пути. Из этого следует, что массовая доля неисправностей приходится на колесные пары и буксовые узлы (рис. 1), так как они являются наиболее основными нагруженными элементами вагонов. Таким образом, возникает потребность в средствах, обеспечивающих контроль их технического состояния в пути следования.

Статистика отказов за период 2016–2019 гг. свидетельствует об увеличении количества неисправностей, связанных с дефектами поверхности катания колесных пар. Наблюдается рост интенсивности эксплуатации подвижного состава в связи с увеличением объема перевозимых грузов и скорости движения поездов, вследствие чего становится необратимым процесс повышенного износа деталей и узлов подвижных единиц.

Как известно, колесная пара является основным несущим элементом подвижного состава, которая должна безотказно работать под воздействием вертикальных (радиальных) и горизонтальных (осевых) нагрузок [4]. Взаимодействие элементов подвижного состава в системе «колесо–рельс» вызывает существенный износ основных компонентов данной системы,

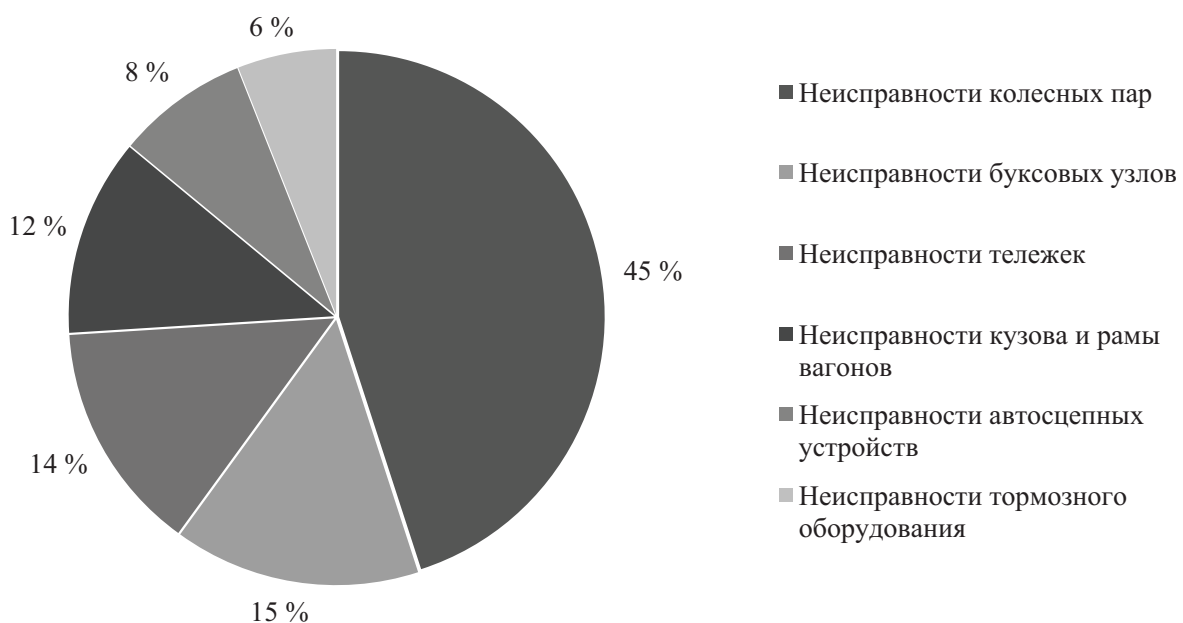


Рис. 1. Диаграмма распределения неисправностей вагонов по основным узлам на Восточно-Сибирской железной дороге с 2016 по 2019 г.

но в большей степени износ наблюдается на колесных парах вагонов. В процессе эксплуатации у вагонов в худшую сторону изменяются геометрические параметры колеса, снижаются прочностные характеристики и качество металла на поверхности катания. Следовательно, повышается вероятность снижения уровня обеспечения безопасности движения на железнодорожном транспорте [5].

Вместе с тем статистика отцепок вагонов по неисправностям колесных пар на Восточно-Сибирской железной дороге за период 2016–2019 гг. свидетельствует об увеличении количества отказов грузовых вагонов в эксплуатации.

Таким образом, из диаграммы отцепок вагонов в текущий отцепочный ремонт по неисправностям колесных пар на Восточно-Сибирской железной дороге (рис. 2) следует, что количество отцепленных вагонов в 2018 г. выросло на 14,5 % по сравнению с предыдущим годом. Вероятно, это связано с несоблюдением технологии ремонта как подвижного состава, так и рельсового пути, в результате чего на колесных парах появляются такие дефекты как выщербины, неравномерный прокат, ползуны и др.

Согласно данным, представленным на диаграмме распределения отцепок вагонов по

основным неисправностям колесных пар на Восточно-Сибирской железной дороге (рис. 3), можно сделать вывод, что к основным неисправностям колесных пар относятся тонкий гребень, выщербины и неравномерный прокат по кругу катания на поверхности колеса. Образование тонкого гребня можно объяснить наличием большого количества кривых малого радиуса, что приводит к его интенсивному износу. Выщербины и неравномерный прокат по кругу катания возникают при прохождении колесными парами рельсовых стыков, стрелочных переводов и других неисправностей рельсового пути. Для должного обеспечения безотказной работы железнодорожного транспорта и предотвращения крушений подвижного состава необходимо осуществлять контроль технического состояния колесных пар в пути следования.

Автоматические комплексы контроля технических измерений колесных пар в процессе движения подвижного состава являются неотъемлемой частью в деле обеспечения безопасности движения на Восточно-Сибирской железной дороге. Автоматизированный диагностический комплекс технических измерений служит для измерения значимых параметров геометрии колесных пар, способствует

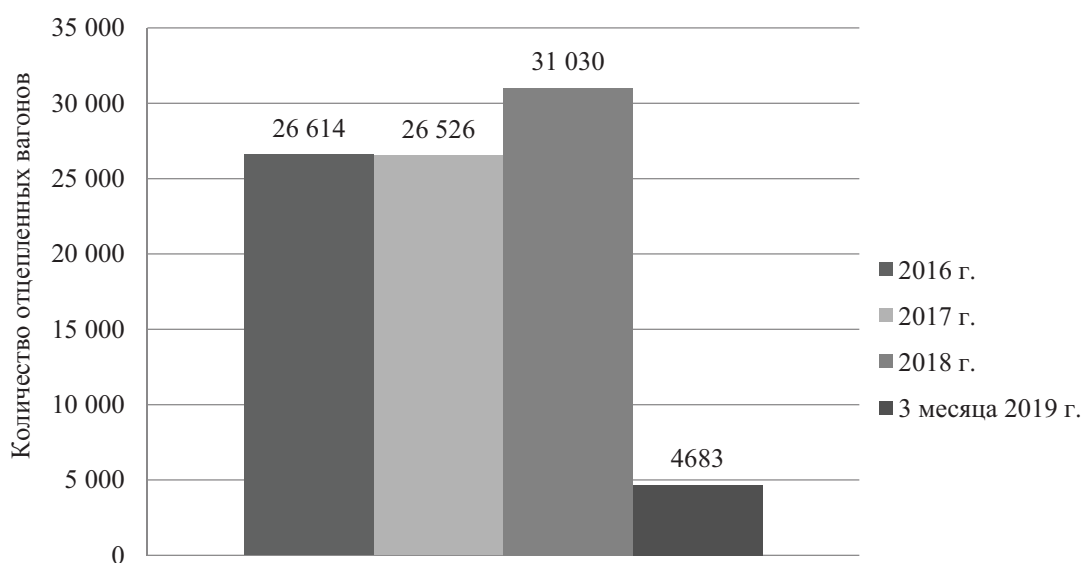


Рис. 2. Диаграмма отцепок вагонов в текущий отцепочный ремонт по неисправностям колесных пар на Восточно-Сибирской железной дороге за период 2016–2019 гг.



Рис. 3. Диаграмма распределения отцепок вагонов по основным неисправностям колесных пар на Восточно-Сибирской железной дороге за период 2016–2019 гг.

выявлению дефектов и износа поверхности катания колесных пар в процессе движения и оперативной передачи информации о неисправности на ближайший пункт технического обслуживания вагонов [6].

В основе метода технического решения над контролем главных геометрических параметров колесных пар используется правило автоматического сканирования с применением комплекта измерительных датчиков триангуляционного типа, при котором каждое колесо, проходя участок, на котором установлена аппаратура, параллельно и независимо друг от друга сканируется внутренними внешними измерительными датчиками (рис. 4) [7–10].

Из диаграммы работы комплекса технических измерений на Восточно-Сибирской железной дороге (рис. 5) следует, что в 2017 г. системой было проконтролировано 2951 132 вагонов. Из них 11 952 вагона с тревожными показаниями; в свою очередь, 7862 подтвердились, 2041 вагон был отцеплен в текущий отцепочный ремонт по тревожным показаниям и 1437 вагонов также были отцеплены по предварительным показаниям комплекса. В 2018 г. системой было проконтролировано 3 899 828 вагонов, из них 10 622 вагона с тревожными показаниями; в свою очередь, 5117 подтвердились, 2909 вагонов было отцеплено в текущий отцепочный ремонт по тревожным показаниям и 1599 вагонов также

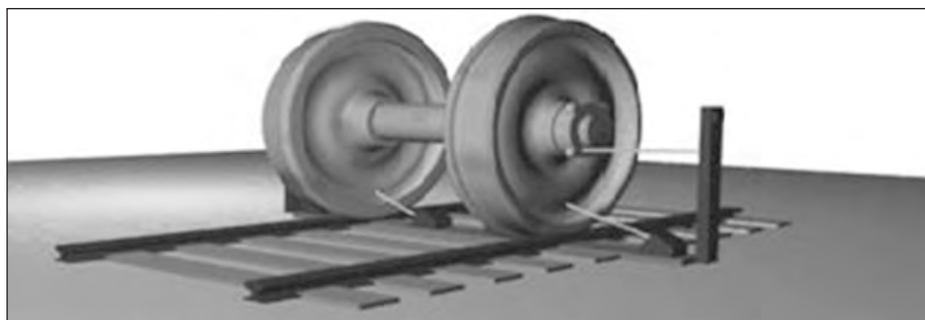


Рис. 4. Автоматическое сканирование колесных пар комплексом технических измерений

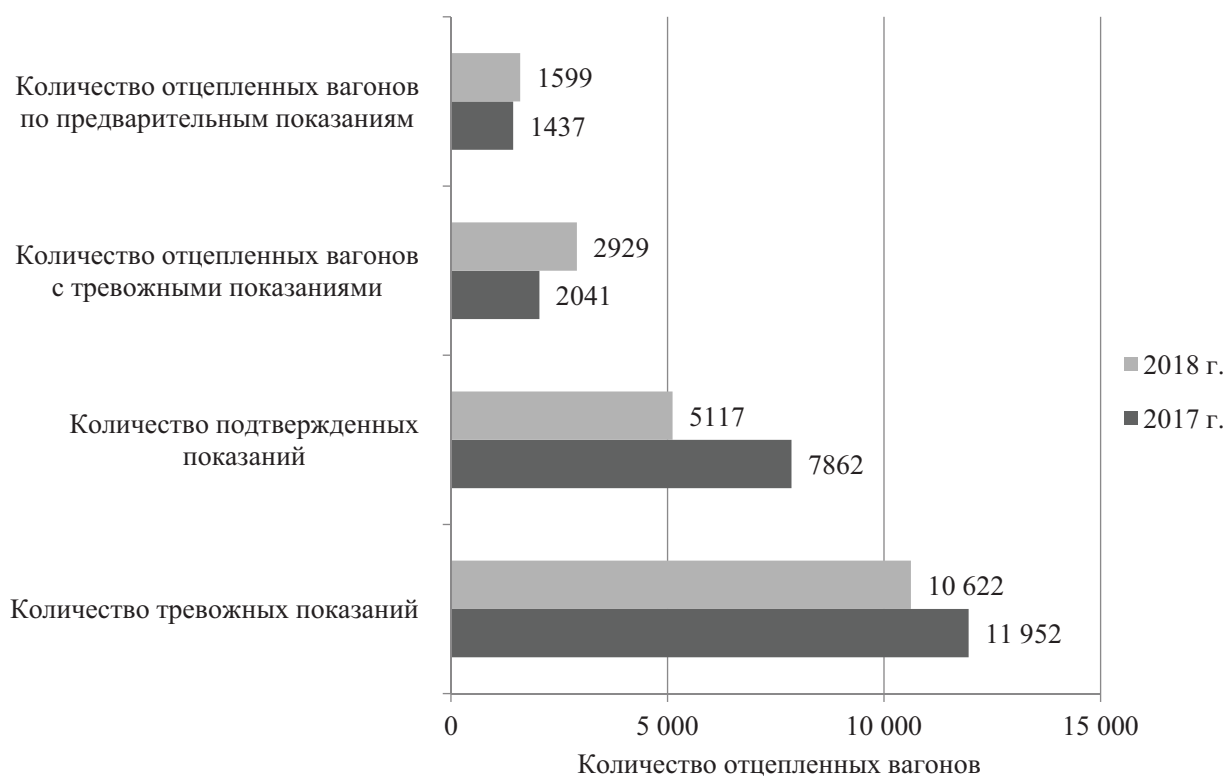


Рис. 5. Диаграмма работы комплекса технических измерений на Восточно-Сибирской железной дороге за период 2017–2018 гг.

были отцеплены по предварительным показаниям комплекса.

По диаграмме зависимости тревожных показаний и отцепок вагонов в текущий отцепочный ремонт в период 2017–2018 гг. (рис. 6) можно заметить, что количество отцепок вагонов за данный период значительно меньше, чем тревожных показаний комплекса технических измерений, в 4–6 раз, что обусловлено его некорректной работой и частыми сбоями при измерении.

При тревожных показаниях комплекса технических измерений транзитный поезд отправляют на пункт технического обслуживания для проведения контрольных замеров параметров колесных пар. Это прежде всего способствует выходу поезда из графика движения на неопределенное время и оказывает прямое влияние на штатную работу станции.

Как известно, контрольные замеры основных параметров колесных пар и дефектов, появляющихся в процессе эксплуатации

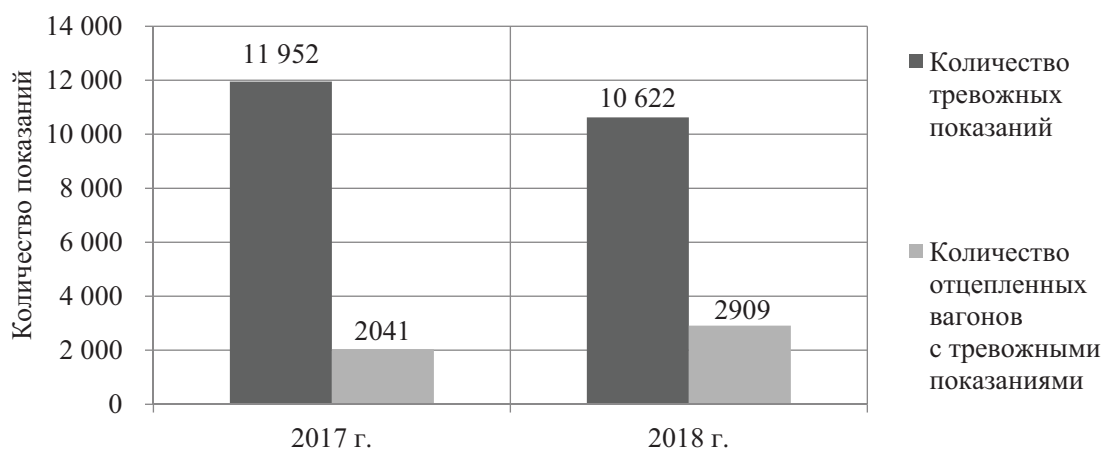


Рис. 6. Диаграмма зависимости тревожных показаний и отцепок вагонов в текущий отцепочный ремонт в период 2017–2018 гг.

подвижного состава, производят примитивными средствами измерения (линейка, абсолютный шаблон, толщиномер и др.) [11]. Как показывает практика, такие инструменты не способны гарантировать достоверность показаний в связи с некоторыми особенностями эксплуатации: наплывом металла на вершину гребня (острый гребень), разницей толщины гребня по всему кругу колеса. Таким образом, необходимы дополнительные затраты времени для проведения контрольных замеров осмотрщиком-ремонтником вагонов.

Так, в связи с тем, что нужно уменьшить время обработки подвижного состава и простоя поездов на станциях формирования, возникает потребность внедрения универсального прибора для контроля параметров колесных пар подвижных единиц, который, в свою очередь, заменяет существующие шаблоны. Таким в настоящее время является лазерный профилометр серии ИКП.

Данный профилометр был изготовлен обществом с ограниченной ответственностью «РИФТЕК», г. Минск, Республика Беларусь, для лазерного сканирования и анализа профиля колеса посредством бесконтактного измерения геометрических параметров поверхности катания колесных пар (рис. 7) [12].

Профилометр зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений РФ, № 35128-07 [13] и в Реестре средств изме-

рений, допущенных к применению в ОАО «РЖД», № МТ 052.2012 [14]. Прибор содержит программный комплекс и базу данных для сбора и обработки проведенных измерений. Рассматривая принцип работы прибора, можно отметить главное преимущество – возможность бесконтактного сканирования поверхности катания одного из колес колесной пары командой с карманного персонального компьютера (КПК) [15].

В связи с имеющейся необходимостью сокращения времени обработки подвижного состава в случае тревожных показаний комплекса технических измерений был проведен эксперимент по сравнению затрат времени на снятие показаний лазерным профилометром и абсолютным шаблоном с целью выявления наиболее эффективного средства измерения.



Рис. 7. Лазерный профилометр поверхности катания колесных пар

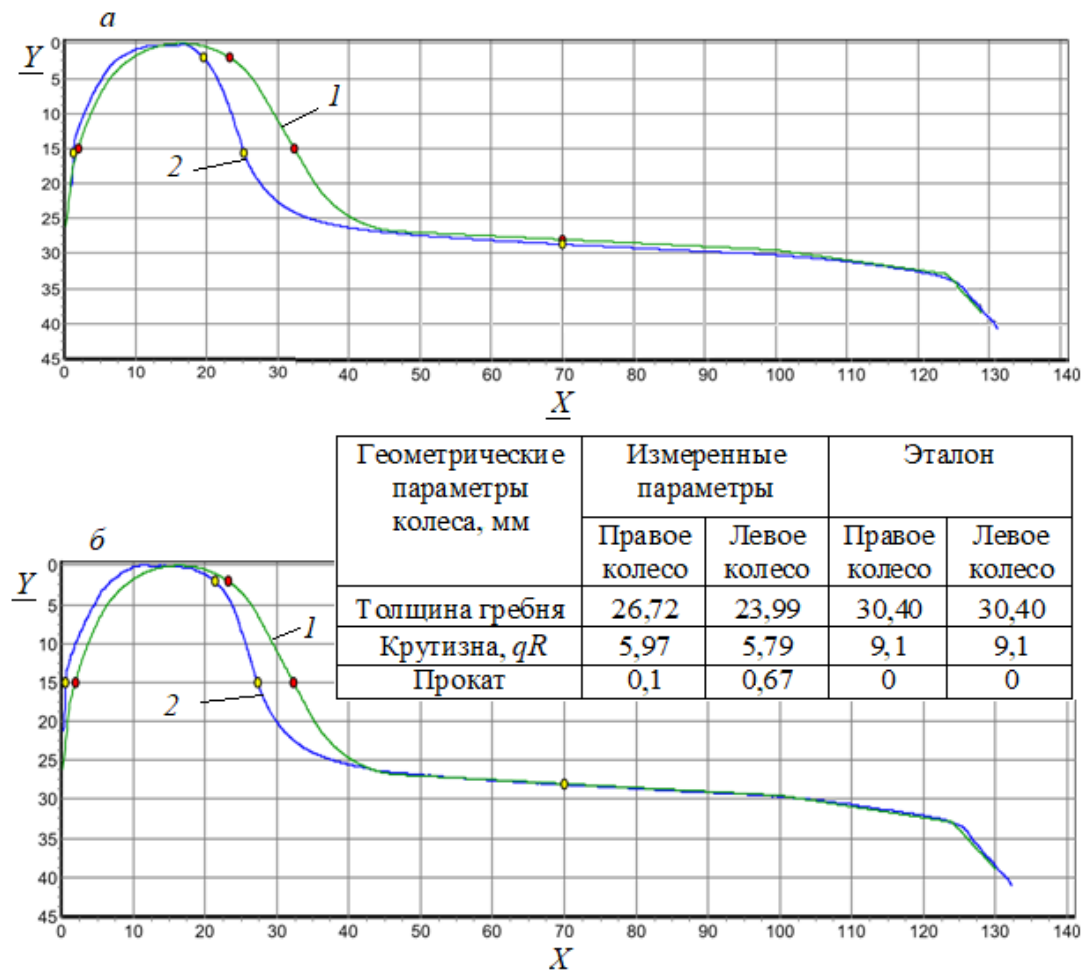


Рис. 8. Вид реальных профилей двух колес одной колесной пары, толщина гребня на расстоянии 13 мм от поверхности катания: *a* – профиль левого колеса, *б* – профиль правого колеса; *1* – эталонный профиль поверхности катания, *2* – профиль, полученный в результате измерений

Суть данного эксперимента состояла в определении допусков изменения нормативного значения толщины гребней колес грузовых вагонов в эксплуатации в системе взаимодействия «колесо–рельс». Исследования технического состояния колесных пар грузовых вагонов проводились совместно с работниками лаборатории «Колесные пары и буксовый узел» АО «ВНИИЖТ» на станции Иркутск-Сортировочный Восточно-Сибирской железной дороги в парках приема поездов. В ходе изучения технического состояния колесных пар грузовых вагонов, эксплуатируемых на сети железных дорог Российской Федерации, было проведено снятие профилей поверх-

ности катания обоих колес каждой колесной пары лазерным профилометром, абсолютным шаблоном были сняты параметры толщины гребней и проката. Были совершены обмеры 1020 колесных пар грузовых вагонов.

Так, при помощи лазерного профилометра были проведены замеры основных параметров колесных пар, таких как на рис. 8: толщина гребня, кругизна гребня, qR , прокат на поверхности катания.

На данном рисунке представлен пример измерения поверхности катания правого и левого колес грузового вагона и сравнения ее со стандартным (эталонным) профилем нового колеса. Сравнивая профили поверхно-

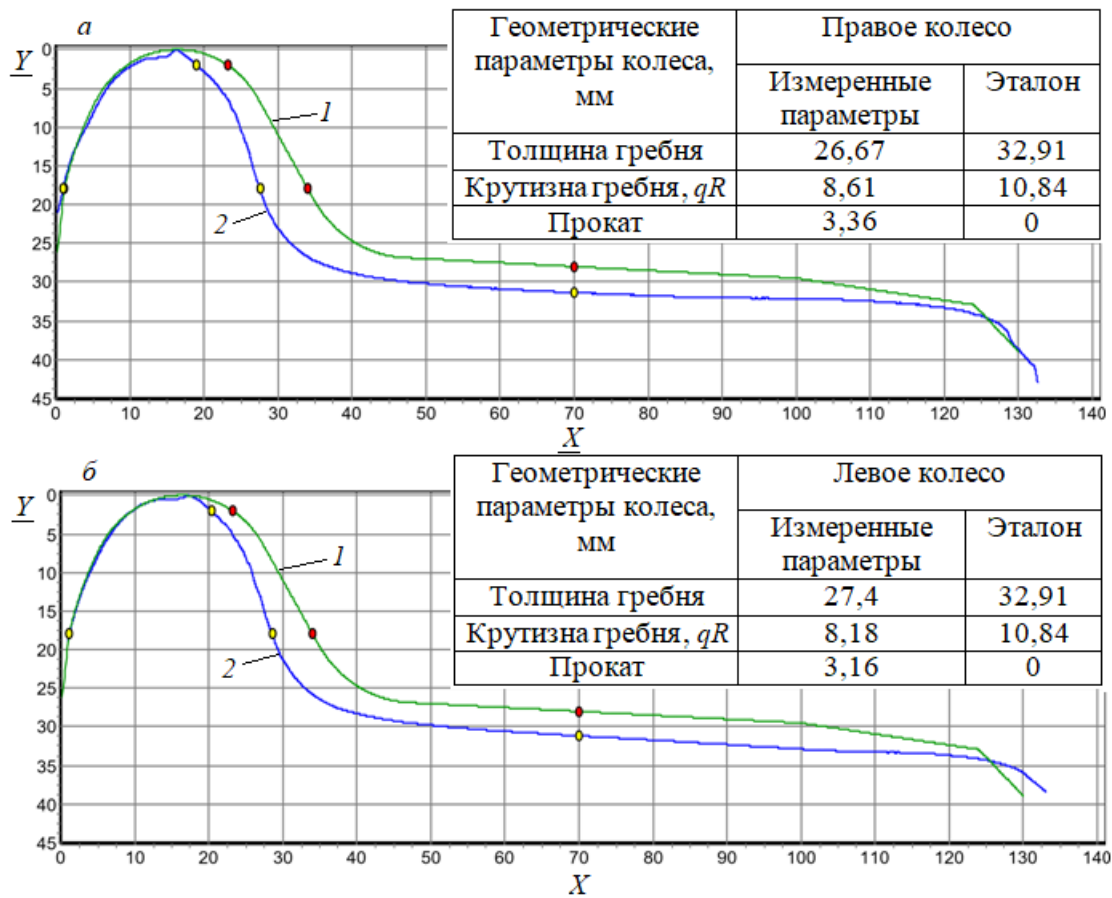


Рис. 9. Вид реальных профилей колес с началом образования остроконечного наката в сравнении со стандартным профилем (обозначения см. рис. 8)

сти катания, можно заметить отклонение от допустимых значений толщины и крутизны гребня левого колеса. Проведенные лазерным профилометром измерения позволяют сделать вывод, что за счет довольно сложных условий эксплуатации вагонов на Восточно-Сибирском полигоне в виде большого количества горно-перевальных участков и кривых малого радиуса повышаются износ и вероятность выхода из строя элементов системы «колесо–рельс».

Далее были произведены замер колесной пары с начальной стадии образования остроконечного наката гребня колеса и сравнение его со стандартным профилем (рис. 9). При сравнении двух профилей можно заметить существенное отклонение основных показателей параметров поверхности катания колесной пары, что говорит об отступлении от установленных параметров вершины гребня, т. е. образовании

выступа по круговому периметру, возникающем в процессе пластической деформации верхних слоев металла гребня в сторону его вершины. Это явление вызвано высоким контактным давлением и интенсивным трением в месте соприкосновения с головкой рельса на гребне, где появляется остроконечный накат. Представленное явление вызвано некорректной работой колесной пары, неправильной установкой ее в тележке путем несоблюдения допускаемых размеров по разнице диаметров колес на одной оси и длительной работой на путях с кривыми малого радиуса. Также на появление остроконечного наката существенным образом влияют изгиб оси колесной пары, перекос боковой рамы тележки и неправильная посадка колеса на ось.

Полученные данные в ходе проведенного эксперимента показали, что лазерный про-

филометр — незаменимый инструмент при измерении профиля поверхности катания и дефектов колесных пар подвижного состава, что подтверждается рассмотренными графиками профилей поверхности катания. В процессе сбора данных лазерный профилометр зарекомендовал себя как эффективный и оперативный в действии инструмент, позволяющий измерять различные формы профилей поверхности катания без временных затрат на калибровку и обучение, отображать на дисплее и сохранять результаты измерений в электронном виде. Немаловажным достоинством является возможность проведения замеров непосредственно на подвижном составе, что сокращает время на осуществление технологических операций.

В качестве одного из направлений развития в данном исследовании предлагается внедрение лазерного профилометра в эксплуатацию для контрольных замеров после возникновения тревожных показаний комплекса технических измерений, так как это способствует более оперативной работе и снижению времени на проведение технологических операций при обслуживании подвижного состава.

Библиографический список

1. Филлипов В. Н. Инновационные вагоны и проблемы их взаимодействия с элементами инфраструктуры / В. Н. Филлипов, А. В. Смольянинов, И. В. Козлов, Я. Д. Подлесников // Безопасность движения поездов : Труды Семнадцатой науч.-практич. конференции. – М. : МГУПС (МИИТ), 2016. – С. 68–73.
2. Маджидов Ф. А. Оценка параметра безопасности грузового вагона и управление эффективностью его использования с учетом изменения параметров эксплуатационной среды / Ф. А. Маджидов // Безопасность движения поездов : Труды Семнадцатой науч.-практич. конференции. – М. : МГУПС (МИИТ), 2016. – С. 96–98.
3. Стратегия развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 года. – Распоряжение Правительства РФ от 17 июня 2008 г. № 877-р. – URL : <http://www.mintrans.ru/documents/1/1010> (дата обращения : 06.05.2019).
4. Технология производства и ремонта вагонов : учебник / под ред. К. В. Мотовилова. – М. : Маршрут, 2013. – 286 с.
5. Романова О. В. Взаимодействие пути и подвижного состава / О. В. Романова, В. Н. Бобокова // Материалы X Междунар. студенч. науч. конференции, Студенческий научн. форум, 2018. – URL : <https://scienceforum.ru/2018/article/2018005669> (дата обращения : 06.05.2019).
6. Миколайчук Т. А. Эффективность использования современных средств диагностики подвижного состава / Т. А. Миколайчук // Науч. сообщество студентов: междисциплинарные исследования: электрон. сб. статей по материалам XXIII Междунар. студенч. науч.-практич. конференции. – 2017. – № 12 (23). – URL : [https://sibac.info/archive/meghdis/12\(23\).pdf](https://sibac.info/archive/meghdis/12(23).pdf) (дата обращения : 07.05.2019).
7. Плотников С. В. Лазерный диагностический комплекс для контроля колесных пар вагонов на ходу поезда / С. В. Плотников, А. Н. Байбаков, В. М. Гуренко, В. И. Патерикин, С. П. Юношев, В. В. Сотников, Ю. В. Чугуй // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2005. – № 5. – URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/lazernyy-diagnosticheskiy-kompleks-dlya-kontrolya-kolesnyh-par-vagonov-na-hodu-poezda> (дата обращения : 06.05.2019).
8. Hauschild G. Automatic diagnosis of wheelsets using the ARGUS system / G. Hauschild // *Glaser's Annalen*. – 2001. – N 12. – P. 615–625.
9. Morgan R. Evaluation of wheel measurement systems / R. Morgan // *Railway Track & Structures*. – 2002. – N 7. – P. 13–15.
10. Венедиктов А. З. Измерение параметров колесных пар подвижного состава в движении / А. З. Венедиктов, В. Н. Демкин, Д. С. Боков // Железные дороги мира. – 2003. – № 9. – С. 33–39.
11. Инструменты и принадлежности осмоторщика-ремонтника вагонов. – М. : Информ. портал Вагонник.РФ, 2019. – URL : http://www.xn--80adeukqag.xn--p1ai/2016/01/blog-post_42.html (дата обращения : 06.05.2019).
12. Лазерный профилометр поверхности катания колесных пар. – Минск : Группа компаний «РИФ-ТЭК», 2019. – URL : <https://riftek.com/ru/products/>

~show/equipment/railway-devices/railway-wheel-profile-gauge-ikp (дата обращения : 06.05.2019).

13. Профилометры поверхности катания колесной пары № 35128-07 от 08.05.2018 г. – М. : Гос. реестр средств измерений Российской Федерации. – URL : <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4/items/344158> (дата обращения : 06.05.2019).

14. Реестр средств измерений, допущенных к применению в ОАО «РЖД». – № МТ 052.2012. – URL : http://www.rzd-expo.ru/innovation/the_system_of_technical_regulation/metrology/reestr_2019.pdf (дата обращения : 06.05.2019).

15. Лазерный профилометр поверхности катания колесных пар. Принцип работы. – Минск :

Группа компаний «РИФТЭК», 2019. – URL : <https://riftek.com/ru/products/~show/equipment/railway-devices/railway-wheel-profile-gauge-ikp> (дата обращения : 06.05.2019).

Дата поступления: 19.06.2019

Решение о публикации: 28.06.2019

Контактная информация:

МАРТЫНЕНКО Любовь Викторовна – аспирант; liuba.martinenko@yandex.ru

СОСНОВ Николай Юрьевич – аспирант; sosnov.nikola@yandex.ru

Laser profilometer for rolling surface as a universal measuring instrument for wheel pair profile for alarming indications of a technical measurements system

L. V. Martynenko, N. Yu. Sosnov

Irkutsk State Transport University, 15, Chernyshevsky ul., Irkutsk, 664074, Russian Federation

For citation: Martynenko L. V., Sosnov N. Yu. Laser profilometer for rolling surface as a universal measuring instrument for wheel pair profile for alarming indications of a technical measurements system. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 3, pp. 427–438. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-427-438 (In Russian)

Summary

Objective: To analyse the operation of a technical measurement system on the East Siberian Railway and its impact on the operation of maintenance points with the practice of using a laser profilometer for the rolling surface of wheel pairs. **Methods:** Analyses of the main defects of wagons brought about by the process of operation on the East Siberian Railway, in the process of which the nomenclature of distribution of defects of wagons by the main bearing nodes is presented, as well as the analysis of defects of wheel sets formed during the operation on the East Siberian Railway for the period of 2016–2019 were carried out. Inductive method has revealed the influence of the work of the technical measurements system on the occurrence of technological disturbances and train delays at marshalling stations. The theory of reducing time for processing trains, when control measurements are conducted by a laser profilometer, was confirmed by experiment. In the course of the production experiment, an analysis was made of data obtained from measuring various profiles of the rolling surface of freight wagons including wheel sets with defects in comparison with the reference profile. **Results:** The authors have identified significant shortcomings in the operation of the technical measurement system in operation on the East Siberian Railway affecting the throughput of stations and technical service points. The main problem of early wagon repair for malfunctions of the wheel set wheel skid surface is identified. A proposal was made for introduction into production of a laser profilometer for measuring the rolling surface of wheel sets in order to reduce the processing time of transit trains at marshalling stations. The main advantages of a

laser profilometer for the rolling surface of wheel sets for subsequent commissioning are outlined. **Practical importance:** Recommendations have been developed for putting a laser profilometer into operation at rolling stock processing and marshalling stations near which a technical measurements system has been installed, in order to reduce the time for conducting control measurements as a result of alarming and preliminary indications of equipment.

Keywords: Railway, railway transport, rolling stock, wagon, wheel set, laser profilometer, rolling surface defects, technical measurement system, failure statistics, wheel set faults, wagon faults, rolling stock, wheel-rail system.

References

1. Fillipov V.N., Smol'ianinov A. V., Kozlov Y. V. & Podlesnikov Ya. D. Innovatsionnye vagoni i problema ikh vzaimodeistviia s elementami infrastruktury [Innovative wagons and problems of their interaction with infrastructure elements]. *Bezopasnost' dvizheniia poezdov. Trudy Semnadsatoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Train Traffic Safety. Proceedings of the 17th Scientific Practical Conference]. Moscow, MGUPS (MIIT) [Moscow State Transport University] Publ., 2016, pp. 68–73. (In Russian)

2. Madzhidov F. A. Otsenka parametra bezopasnosti gruzovogo vagona i upravlenie effektivnost'iu ego ispol'zovaniia s uchetom izmeneniia parametrov ekspluatatsionnoi sredy [Assessment of the safety parameter of a cargo wagon and management of the efficiency of its use with regard to changes in the parameters of the operating environment]. *Bezopasnost' dvizheniia poezdov. Trudy Semnadsatoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Train Traffic Safety. Proceedings of the 17th Scientific Practical Conference]. Moscow, MGUPS (MIIT) [Moscow State Transport University] Publ., 2016, pp. 96–98. (In Russian)

3. *Strategiia razvitiia zheleznodorozhnogo transporta v Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda* [Strategy for development of railway transport in the Russian Federation through to 2030]. Order of the Government of the Russian Federation of June 17, 2008, no. 877-r. Available at: <http://www.mintrans.ru/documents/1/1010> (accessed: 06.05.2019). (In Russian)

4. *Tekhnologiya proizvodstva i remonta vagonov*. Uchebnik [Technology of production and repair of wagons. Study book]. Ed. by K. V. Motovilova. Moscow, Marshrut Publ., 2013, 286 p. (In Russian)

5. Romanova O. V. & Bobokova V. N. Vzaimodeistvie puti i podvizhnogo sostava [Interaction of track and rolling

stock]. *Materialy X mezhdunarodnoi studencheskoi nauchnoi konferentsii, Studencheskii nauchnyi forum* [Proceedings of the X International Student Scientific Conference, Student Scientific Forum], 2018. Available at: <https://scienceforum.ru/2018/article/2018005669> (accessed: 06.05.2019). (In Russian)

6. Mikolaichuk T. A. Effektivnost' ispol'zovaniia sovremennykh sredstv diagnostiki podvizhnogo sostava [Effective use of modern diagnostic tools for rolling stock]. *Nauchnoe soobshchestvo studentov: mezhdistsiplinarnye issledovaniia: elektronnyi sbornik statei po materialam XXIII mezhdunarodnoi studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Scientific community of students: interdisciplinary research: an electronic collection of articles based on XXIII International student scientific and practical conference], 2017, no. 12 (23). Available at: [https://sibac.info/archive/meghdis/12\(23\).pdf](https://sibac.info/archive/meghdis/12(23).pdf) (accessed: 07.05.2019). (In Russian)

7. Plotnikov S. V., Baibakov A. N., Gurenko V. M., Paterikin V. I., Iunoshev S. P., Sotnikov V. V. & Chugui Yu. V. Lazernyi diagnosticheskii kompleks dlia kontrolya kolesnykh par vagonov na khodu poezda [Laser diagnostic system for monitoring wagon wheel pairs during train movement]. *Interexpo Geo-Sibir'* [Interexpo Geo-Siberia], 2005, no. 5. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/lazernyy-diagnosticheskiy-kompleks-dlya-kontrolya-kolesnykh-par-vagonov-na-hodu-poezda> (accessed: 06.05.2019). (In Russian)

8. Hauschild G. Automatic diagnosis of wheelsets using the ARGUS system. *Glaser's Annalen*, 2001, no. 12, pp. 615–625.

9. Morgan R. Evaluation of wheel measurement systems. *Railway Track & Structures*, 2002, no. 7, pp. 13–15.

10. Venediktov A. Z., Demkin V. N. & Bokov D. S. Izmerenie parametrov kolesnykh par podvizhnogo

sostava v dvizhenii [Measurement of parameters of rolling stock wheel sets in motion]. *Zheleznye dorogi mira* [World Railways], 2003, no. 9, pp. 33–39. (In Russian)

11. *Instrumenty i prinadlezhnosti osmotrshchika remontnika vagonov* [Tools and accessories of a wagon examiner-repairman]. Vagonnik.RF website, Moscow, 2019. Available at: http://www.xn-80adeukqag.xn-p1ai/2016/01/blog-post_42.html (accessed: 06.05.2019). (In Russian)

12. *Lazernyi profilometr poverkhnosti kataniia kolesnykh par* [Laser profilometer for wheel sets' rolling surface]. Minsk, Website of the RIFTEK group of companies, 2019. Available at: <https://riftek.com/ru/products/~show/equipment/railway-devices/railway-wheel-profile-gauge-ikp> (accessed: 06.05.2019). (In Russian)

13. *Profilometry poverkhnosti kataniia kolesnoi pary* [Profilometers for rolling surface of wheel set], no. 35128-07, May 08, 2018. Moscow, State register of measuring instruments of the Russian Federation Publ., 2018. Available at: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4/items/344158> (accessed: 06.05.2019). (In Russian)

14. *Reestr sredstv izmerenii, dopushchennykh k primeneniuu v OAO RZhD* [Register of measuring instruments approved for use by Russian Railways JSC], no. MT 052.2012. Available at: http://www.rzd-expo.ru/innovation/the_system_of_technical_regulation/metrology/reestr_2019.pdf (accessed: 06.05.2019). (In Russian)

15. *Lazernyi profilometr poverkhnosti kataniia kolesnykh par. Printsip raboty* [Laser profilometer for wheel sets' rolling surface. Principle of operation]. Minsk, Website of the RIFTEK group of companies, 2019. Available at: <https://riftek.com/ru/products/~show/equipment/railway-devices/railway-wheel-profile-gauge-ikp> (accessed: 06.05.2019). (In Russian)

Received: June 19, 2019

Accepted: June 28, 2019

Author's information:

Liubov' V. MARTYNENKO – Postgraduate Student; liuba.martinenko@yandex.ru

Nikolai Yu. SOSNOV – Postgraduate Student; sosnov.nikola@yandex.ru

УДК 656.225.073.433

Вопросы развития железнодорожной линии Ахангаран–Тукимачи–Сырдарьинская

С. Б. Сатторов, А. Г. Котенко, В. Л. Белозеров

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

Для цитирования: Сатторов С. Б., Котенко А. Г., Белозеров В. Л. Вопросы развития железнодорожной линии Ахангаран–Тукимачи–Сырдарьинская // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 3. – С. 439–448.

DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-439-448

Аннотация

Цель: Определение путей развития линии Ахангаран–Тукимачи–Сырдарьинская на основе моделирования провозной способности и сравнение ее с фактическим грузопотоком для рационального регулирования и нормирования пропускания поездов. **Методы:** Для прогнозирования динамики роста провозной и пропускной способностей на рассматриваемой линии применен метод аппроксимации. **Результаты:** Разработана модель прогнозирования, которая соответствует характеру изменения тенденции изучаемого грузопотока. Она позволит предвидеть затруднения в перевозочном процессе, выработать этапность развития линии для улучшения пропускной способности перегонов, правильно спланировать работу перегрузочных пунктов, организовать рациональное использование средств железнодорожного транспорта. **Практическая значимость:** Линия Ахангаран–Тукимачи–Сырдарьинская является основным транзитным направлением, который влияет на всю работу железной дороги Республики Узбекистан. Совершенствование линии для пропускания транзитных и местных грузопотоков улучшит конкурентоспособность железной дороги в сфере грузовых перевозок.

Ключевые слова: Железнодорожный транспорт, пропускная способность, грузопоток, прогнозирование, динамический ряд, метод наименьших квадратов.

Введение

Железнодорожная линия Ахангаран–Тукимачи–Сырдарьинская связывает промышленные регионы Узбекистана с центром и областями. В перспективе она станет ключевым звеном транспортного коридора Восток–Запад в налаживании регулярных перевозок грузов из Китая в страны Центральной Азии, Турции и Европы, а также в Иран, предоставит удобный выход к портам Персидского залива и Тихого океана и обеспечит стимулирование освоения и использования природных ресурсов страны, активизацию международной торговли и туризма.

Учитывая возрастающие объемы грузопотока и перспективность использования транспортно-транзитного потенциала Узбекистана, необходимо повысить эффективность работы железнодорожного транспорта. Одним из важнейших условий эффективного освоения растущих перевозок является развитие провозной и пропускной способностей узбекских железных дорог [1].

Понимая под провозной способностью линии максимальное количество тонн груза, которое может быть перевезено за единицу времени при конкретной технологии организации перевозок и неизменной структуре грузопотока, известно, что на перспективу ее

устанавливают прогноз с учетом различных факторов [2]. При этом существующие методы прогнозирования грузопотока основываются на определении таких объемов перевозок, которые могут служить ориентиром для планирования развития пропускной способности участков железной дороги [3].

Для выбора рациональной системы организации движения поездов, а также графика движения поездов на линии и установления их обоснованного соотношения при растущем грузопотоке следует рассчитать величину усиления пропускной способности железнодорожных участков.

Необходимость проведения мероприятий по усилению пропускной способности линии Ахангаран–Тукимачи–Сырдарьинская обосновывается двумя основными причинами: перспективным ростом объема перевозок и требованиями совершенствования техники и перевозочных средств [4, 5].

Постановка задачи

Задача заключается в том, что нужно оценить рост грузопотока на последующие годы на линии Ахангаран–Тукимачи–Сырдарьинская и выбрать схему усиления пропускной способности направления, в части реконструктивных и организационно-технических мер с установлением сроков их ввода [6, 7]. Определение таких сроков – задача, которую необходимо решать для каждого участка и каждого этапа его развития [8, 9]. Сроком исчерпания пропускной способности участков является превышение потребной пропускной способности над наличной на момент истечения этапа.

Правильно смоделированная зависимость пропускной способности от фактического динамического роста грузопотока должна соответствовать предполагаемому характеру его изменения [10]. Кривая грузопотока позволяет получить выровненные теоретические значения уровней ее динамического ряда. Это те уровни, которые предположительно должны

наблюдаться в случае полного совпадения динамики грузопотока с ростом величины потребной пропускной способности [11].

Для описания тенденции увеличения объемов грузопотока широко используются модели кривых, представляющие собой различные функции времени $y = f(t)$ [12], однако они предполагают изучение основных свойств построенных кривых. В этой связи целесообразно описать наиболее часто внедряемую на практике модель прогнозирования [3], основанную на кривых, представленных в полиномиальной форме. Для прогнозирования обычно применяются полиномы не выше третьего порядка. Рассмотрим изменение грузопотока с помощью линейной модели полинома первой степени, развивающегося во времени равномерно:

$$\bar{Q}_t = a_0 + a_1 \cdot t, \quad (1)$$

а также параболической модели полинома второй степени, когда грузопоток развивается равноускоренно [12]:

$$\bar{Q}_t = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2, \quad (2)$$

где a_i – параметр многочлена, $i = 0, 1, \dots, p$; t – время, $t = 1, 2, \dots, n$.

В первом приближении параметры модели (1) и (2) можно определить методом наименьших квадратов, т. е. исходя из условия, что сумма квадратов расчетных значений отклонений грузопотока от фактических должна быть минимальной [13].

Таким образом, приведенные оценки находятся в результате минимизации выражения

$$\sum_{t=1}^n (Q_t + \bar{Q}_t)^2 \rightarrow \min, \quad (3)$$

в котором Q_t – фактический грузопоток, млн т; \bar{Q}_t – расчетные значения грузопотока, млн т; n – число уровней динамического ряда.

Система нормальных уравнений грузопотока (1), (2), полученная по выражению (3), имеет вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum Q_t = a_0 \cdot n + a_1 \cdot \sum t + a_2 \times \\ \times \sum t^2 + \dots + a_p \cdot \sum t^p, \\ \sum Q_t \cdot t = a_0 \cdot \sum t + a_1 \cdot \sum t^2 + \\ + a_2 \cdot \sum t^3 + \dots + a_p \cdot \sum t^{p+1}, \\ \dots, \\ \sum Q_t \cdot t^{p-1} = a_0 \cdot \sum t^{p-1} + a_1 \cdot \sum t^p + \\ + a_2 \cdot \sum t^{p+1} + \dots + a_p \cdot \sum t^{2p-1}, \\ \sum Q_t \cdot t^p = a_0 \cdot \sum t^p + a_1 \cdot \sum t^{p+1} + \\ + a_2 \cdot \sum t^{p+2} + \dots + a_p \cdot \sum t^{2p}. \end{array} \right. \quad (4)$$

Она состоит из $(p + 1)$ линейных уравнений, содержащих в качестве неизвестных величин $(p + 1)$ коэффициенты a_0, a_1, \dots, a_p . Решение системы (4) позволяет вычислить искомые коэффициенты [12].

Составление нормальных уравнений можно упростить, воспользовавшись переносом начала координат в середину динамического ряда. Это дает возможность уменьшить абсолютные значения величин, участвующих в расчете [12]. Если до переноса начала координат $t = 1, 2, 3, \dots$, то после переноса:

– для четного числа членов ряда $t = \dots, -5; -3; -1; 1; 3; 5; \dots$;

– для нечетного числа членов ряда $t = \dots, -3; -2; -1; 0; 1; 2; 3; \dots$.

Таким образом, $\sum t^k$, где k – нечетное число, равно нулю, следовательно, такой подход существенно упрощает систему (4).

После переноса начала координат в середину динамического ряда параметры соответствующих полиномов находятся с помощью следующих выражений:

– для линейной модели:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{\sum Q_t}{n}, \\ a_1 &= \frac{\sum Q_t \cdot t}{\sum t^2}; \end{aligned} \quad (5)$$

– для параболической:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{\sum Q_t}{n} - \frac{\sum t^2}{n} \times \\ &\times \left[\frac{n \cdot \sum Q_t \cdot t^2 - \sum t^2 \cdot \sum Q_t}{n \cdot \sum t^4 - (\sum t^2)^2} \right], \\ a_1 &= \frac{\sum Q_t \cdot t}{\sum t^2}, \\ a_2 &= \frac{n \cdot \sum Q_t \cdot t^2 - \sum t^2 \cdot \sum Q_t}{n \cdot \sum t^4 - (\sum t^2)^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Для оценки границ интервального прогноза необходимо рассчитать среднее квадратичное отклонение, которое определяется как обобщающая характеристика размеров вариации признака в совокупности и равно квадратному корню из среднего квадрата отклонений отдельных значений признака средней арифметической [12]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (Q_t - \bar{Q})^2}{n-1}}.$$

Так как число уровней динамического ряда нечетное, то центральный уровень (пятый) принимается за начало отсчета, ему соответствует $t = 0$. Вышестоящие уровни нумеруются с шагом -1 , нижестоящие – с шагом $+1$ [12].

Определение изменения грузопотока на железнодорожной линии Ахангаран–Тукимачи–Сырдарьинская

В табл. 1 приведены результаты прогнозирования с использованием линейной модели (см. (5)).

В соответствии с тем, что

$$a_0 = \frac{405,92}{19} = 21,36,$$

ТАБЛИЦА 1. Расчет параметров линейной модели

n	Объем перевозок, Q_i , тыс. т/год	t	$Q_i \cdot t$	t^2	$Q_i \cdot t^2$	\bar{Q}_i	$Q_i - \bar{Q}_i = \varepsilon$	ε^2
1	14,60	-9	-131,4	81	1182,6	11,31982	3,28	10,76
2	15,30	-8	-122,4	64	979,2	12,43586	2,86	8,20
3	15,90	-7	-111,3	49	779,1	13,5519	2,35	5,51
4	16,10	-6	-96,6	36	579,6	14,66795	1,43	2,05
5	16,20	-5	-81	25	405	15,78399	0,42	0,17
6	16,43	-4	-65,7	16	262,8	16,90004	-0,48	0,23
7	16,60	-3	-49,8	9	149,4	18,01608	-1,42	2,01
8	16,90	-2	-33,8	4	67,6	19,13212	-2,23	4,98
9	17,50	-1	-17,5	1	17,5	20,24817	-2,75	7,55
10	17,80	0	0	0	0	21,36421	-3,56	12,70
11	18,02	1	18,02	1	18,02	22,48025	-4,46	19,89
12	18,25	2	36,5	4	73	23,5963	-5,35	28,58
13	23,40	3	70,2	9	210,6	24,71234	-1,31	1,72
14	25,90	4	103,6	16	414,4	25,82839	0,07	0,01
15	27,38	5	136,875	25	684,375	26,94443	0,43	0,19
16	29,20	6	175,2	36	1051,2	28,06047	1,14	1,30
17	32,85	7	229,95	49	1609,65	29,17652	3,67	13,49
18	33,10	8	264,8	64	2118,4	30,29256	2,81	7,88
19	34,50	9	310,5	81	2794,5	31,40861	3,09	9,56

$$a_1 = \frac{636,15}{570} = 1,12,$$

$$a_1 = \frac{636,15}{570} = 1,12,$$

уравнение линейной модели имеет вид

$$\bar{Q}_i = 21,36 + 1,2 \cdot t.$$

Для определения коэффициентов параболической модели также воспользуемся выражениями, полученными из системы нормальных уравнений (6):

$$a_0 = \frac{636,15}{19} - \frac{570}{19} \times \left[\frac{19 \cdot 636,15 \cdot 570 - 570 \cdot 457,15}{19 \cdot 30\,666 - (570)^2} \right] = 21,36,$$

$$a_2 = \frac{19 \cdot 13\,396,95 \cdot 570 - 570 \cdot 129\,667,2}{19 \cdot 30\,666 - (570)^2} = 0,09.$$

Следовательно, уравнение параболической модели примет вид

$$\bar{Q}_i = 21,36 + 1,12 \cdot t + 0,09 \cdot t^2.$$

На рис. 1 приведены фактические значения грузопотока, перевозимого на линии Ахан-

ТАБЛИЦА 2. Расчет параметров параболической модели

n	Объем перевозок, Q_t , тыс. т/год	t	$Q_t \cdot t^2$	t^2	$Q_t \cdot t^2$	t^4	\bar{Q}_t	$Q_t - \bar{Q}_t = \varepsilon$	ε^2
1	14,60	-9	-131,4	81	1182,60	6561	18,60	-4	16,00
2	15,30	-8	-122,4	64	979,20	4096	18,19	-3	8,34
3	15,90	-7	-111,3	49	779,10	2401	17,96	-2	4,23
4	16,10	-6	-96,6	36	579,60	1296	17,90	-2	3,25
5	16,20	-5	-81	25	405,00	625	18,03	-2	3,35
6	16,43	-4	-65,7	16	262,80	256	18,34	-2	3,66
7	16,60	-3	-49,8	9	149,40	81	18,83	-2	4,95
8	16,90	-2	-33,8	4	67,60	16	19,49	-3	6,72
9	17,50	-1	-17,5	1	17,50	1	20,34	-3	8,05
10	17,80	0	0	0	0,00	0	21,36	-4	12,70
11	18,02	1	18,02	1	18,02	1	22,57	-5	20,70
12	18,25	2	36,5	4	73,00	16	23,96	-6	32,56
13	23,40	3	70,2	9	210,60	81	25,52	-2	4,50
14	25,90	4	103,6	16	414,40	256	27,27	-1	1,87
15	27,38	5	136,875	25	684,38	625	29,19	-2	3,30
16	29,20	6	175,2	36	1051,20	1296	31,30	-2	4,39
17	32,85	7	229,95	49	1609,65	2401	33,58	-1	0,53
18	33,10	8	264,8	64	2118,40	4096	36,05	-3	8,67
19	34,50	9	310,5	81	2794,50	6561	38,69	-4	17,55

гаран–Тукимачи–Сырдарьинская, и расчетные величины уровней, полученные на основе использования как линейной, так и параболической модели.

Среднее квадратическое отклонение равно

$$\delta = \sqrt{\frac{165,34}{19-1}} = 3,03 \text{ млн т.}$$

Прогнозирование по линейной модели нельзя считать удачным, так как прогноз будет сильно занижен [14]. Ближе к фактическим данным расположены уровни временного ряда параболической модели, хотя значение прогноза завышено. Следовательно, долгосрочный прогноз грузопотока на исследуемом участке

на 2030 г. целесообразно вычислять, применяя уравнение параболической модели:

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{2030} &= 21,36 + 1,12 \cdot 1,12 + 0,09 \cdot 21^2 = \\ &= 84,43 \text{ млн т.} \end{aligned}$$

Таким образом, реальный объем грузопотока на линии Ахангаран–Тукимачи–Сырдарьинская в 2030 г. составит $84,43 \pm 3,03$ млн т.

На основе табл. 1 и 2 была построена диаграмма роста грузопотока исследуемой линии. На рис. 2 видно, что грузопоток железнодорожной линии к 2019 г. практически исчерпан, в связи с этим необходимо принимать технические и технологические решения по его повышению.

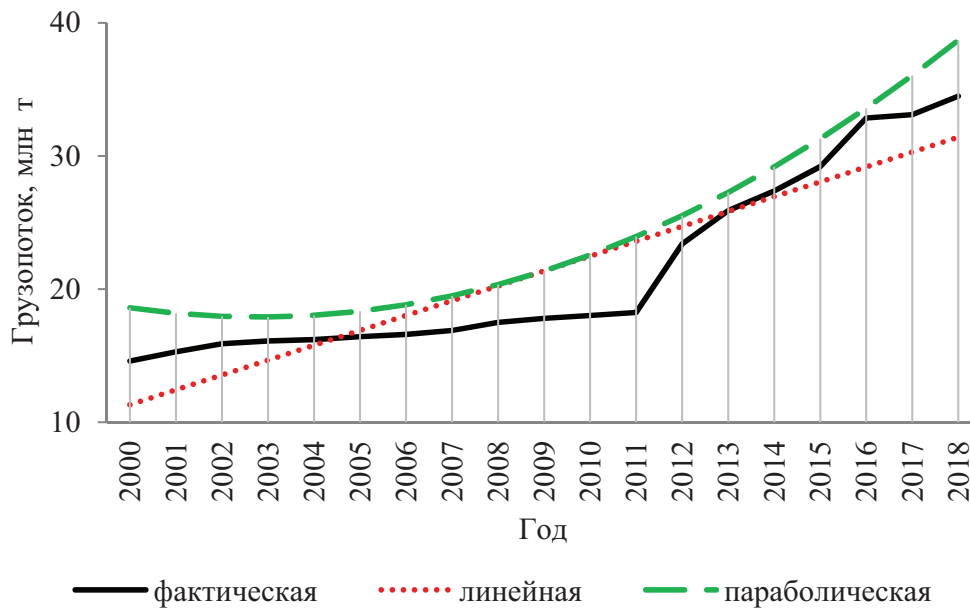


Рис. 1. Диаграммы значений прогнозируемого грузопотока на линии Ахангаран–Тукимачи–Сырдарьинская

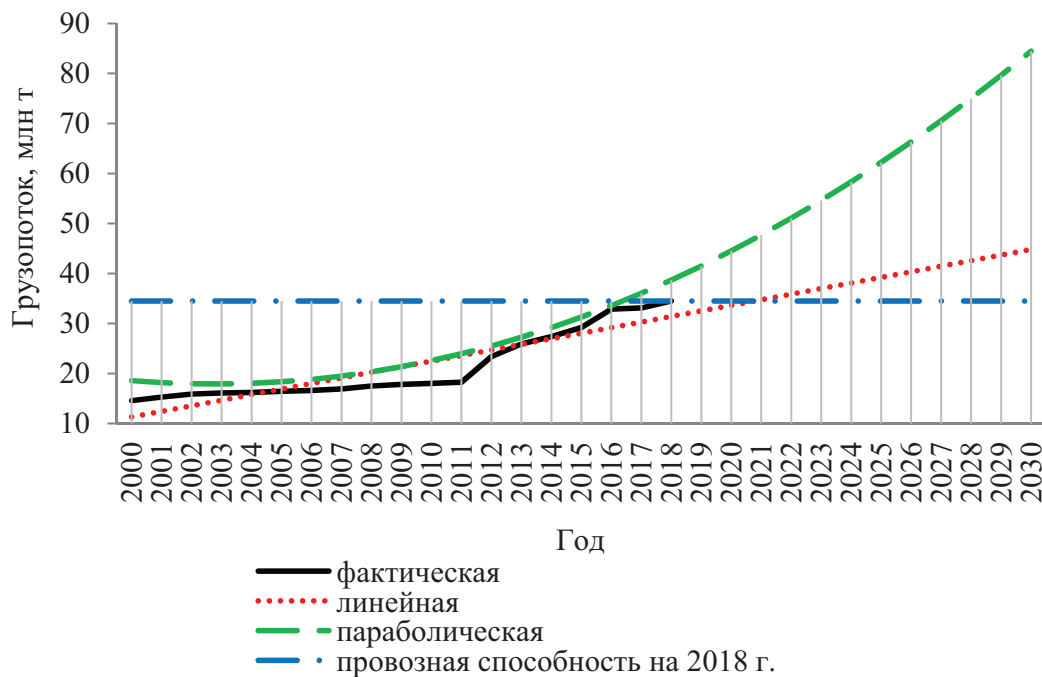


Рис. 2. Диаграммы провозной способности и прогнозируемого грузопотока на линии Ахангаран–Тукимачи–Сырдарьинская

Методические подходы к определению варианта усиления провозной и пропускной способностей

В основе методических подходов при выборе вариантов усиления провозной и пропускной способностей предлагается использовать «Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов» [15], а также методы оценки инвестиционных проектов, изложенных в [16].

Среди возможных вариантов усиления пропускной и провозной способностей рассматриваемой линии могут быть модернизация автоматизированных систем управления с большим числом блок-участков, диспетчерская централизация, внедрение более мощных локомотивов с повышением весовых норм поездов, строительство дополнительных путей и т. д. Каждый из них отличается размерами дополнительных капитальных вложений, а также может привести к увеличению или снижению эксплуатационных затрат.

При рассмотрении варианта важно отметить, что сравнительный интегральный эффект не учитывает не изменяющиеся по вариантам составляющие. Если варианты отличаются друг от друга размерами инвестиций и эксплуатационными расходами, то наиболее эффективное решение будет представлять вариант, имеющий минимум строительно-эксплуатационных расходов:

$$\Theta_{\text{пр}} = \sum_{t=0}^T \frac{K_t}{(1+E_n)^t} + (1-\gamma) \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+E_n)^t},$$

в котором T – производительность расчетного периода; E_n – норма дисконта (в долях единицы, например – 0,08–0,1); K_t – капитальные вложения на t -м шаге расчета; C_t – годовые эксплуатационные расходы в t -м году; γ – доля налоговых отчислений от прибыли.

При постоянных расходах C_i и одноэтапных капитальных вложениях капитала K_i

$$\Theta_{\text{пр}} = K_0 + (1+\gamma) \frac{C}{E_n}.$$

Коэффициент сравнительной эффективности Θ_p отражает изменение годового экономического результата (ΔR) при увеличении инвестиций (ΔK):

$$\Theta_p = \frac{\Delta R}{\Delta K} = \frac{(1-\gamma)\Delta C}{\Delta K},$$

где ΔC – экономия эксплуатационных затрат ($\Delta C > 0$).

При анализе показателей сравнительной эффективности лучшим (наиболее эффективным) будет вариант, имеющий минимальный $\Theta_{\text{пр}}$ и максимальный чистый дисконтированный доход (ЧДД), равный

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T \frac{R_t - Z_t}{(1+E_n)^t} - \sum_{t=0}^T \frac{K_t}{(1+E_n)^t},$$

здесь R_t – результаты (доходы), достигаемые на t -м шаге расчета; Z_t – затраты (текущие издержки), осуществляемые на t -м шаге.

При одноэтапных капитальных вложениях и постоянных по времени результатах целесообразно в качестве критерия использовать Θ_p . Если вариант не требует дополнительных капиталовложений ($\Delta K = 0$), но дает экономию эксплуатационных расходов ($\Delta C > 0$), его следует считать эффективным. Если необходимы дополнительные капитальные вложения ($\Delta K > 0$) при $\Delta C > 0$ и если $\Theta_p > E_n$, то принимается более капиталоемкий проект.

Заключение

Для определения перспективных транзитных и местных грузопотоков на линии Ахангаран–Тукимачи–Сырдарьинская была построена модель прогнозирования, основанная на применении кривых, представленных в полиномиальной форме. Получены результаты прогнозирования с помощью линейной и параболической моделей. Сопоставляя данные прогноза с существующими провозной и наличной пропускной способностями линии, целесообразно сделать вывод о их недостаточной

величине. Исходя из этого, выявлено, что для данной линии следует разработать этапность усиления пропускной способности, с учетом рационального использования технических средств.

В итоге необходимо рекомендовать применение такого варианта этапного усиления пропускной и провозной способностей участка, при котором суммарные строительно-эксплуатационные затраты на освоение возросших перевозок за расчетный период будут минимальными, а ЧДД будет максимальным.

Библиографический список

1. Илесалиев Д. И. Перевозка экспортно-импортных грузов в Республике Узбекистан / Д. И. Илесалиев, Е. К. Коровяковский, О. Б. Маликов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2014. – Вып. 3 (39). – С. 11–17.

2. Осьминин А. Т. Научное решение проблем перевозочного процесса / А. Т. Осьминин // Железнодорожный транспорт. – 2018. – № 12. – С. 12–17.

3. Гоголева А. В. Прогноз средней участковой скорости движения грузовых поездов на основе стохастического моделирования : дис. ... канд. техн. наук, специальность : 05.22.08 / А. В. Гоголева. – СПб. : ПГУПС, 2012. – 132 с.

4. Батурин А. П. Интеллектуализация управления на станционном уровне / А. П. Батурин, И. Н. Шапкин // Железнодорожный транспорт. – 2012. – № 7. – С. 40–43.

5. Громов Н. Н. Управление на транспорте : учебник для вузов / Н. Н. Громов, В. А. Персианов. – М. : Транспорт, 1990. – 336 с.

6. Ефанов А. Н. Оценка экономической эффективности инвестиций и инноваций на железнодорожном транспорте : учеб. пособие / А. Н. Ефанов, Т. П. Коваленок, А. А. Зайцев. – СПб. : ПГУПС, 2001. – 149 с.

7. Козлов П. А. Расчет параметров гармонически построенной сети железных дорог / П. А. Козлов, В. С. Колокольников, Н. А. Тушин // Железнодорожный транспорт. – 2018. – № 12. – С. 18–21.

8. Балжир М. Обоснование освоения перспективных объемов перевозок на монгольской

железной дороге : дис. ... канд. техн. наук, специальность : 05.22.08 / М. Балжир. – СПб. : ПГУПС, 2016. – 128 с.

9. Левин Д. Ю. Как повысить эффективность работы поездного диспетчера / Д. Ю. Левин, Ю. С. Сухарьков // Железнодорожный транспорт. – 2007. – № 11. – С. 8–14.

10. Боровков А. А. Математическая статистика : учебник / А. А. Боровков. – Изд. 4-е, стер. – СПб. : Изд-во «Лань», 2010. – 704 с.

11. Бобров Ю. А. Моделирование работы транспортных систем: инструкция пользователя / Ю. А. Бобров, В. А. Лосева. – СПб. : Ленгипротранс, 2008. – 45 с.

12. Дуброва Т. А. Статистические методы прогнозирования в экономике / Т. А. Дуброва, М. Ю. Архипова. – М. : Изд-во Моск. гос. ун-та экономики, статистики и информатики, 2004. – 136 с.

13. Замковой А. А. Стратегическое прогнозирование объемов перевозок грузов при оценке проектов строительства и развития железнодорожной инфраструктуры / А. А. Замковой // Железнодорожный транспорт. – 2018. – № 7. – С. 37–43.

14. Шапкин И. Н. Нормирование и прогнозирование на железных дорогах (методы, алгоритмы, технологии, расчеты) / И. Н. Шапкин, Р. А. Юсипов, Е. М. Кожанов. – М. : Транспорт, 2006. – 265 с.

15. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов / сост. : В. В. Коссов, В. Н. Лившиц, А. Г. Шахназаров и др. – 2-я ред. – М. : Экономика, 2000. – 421 с.

16. Белозеров В. Л. Экономика транспорта: управление в рыночных условиях : монография / В. Л. Белозеров, А. Н. Ефанов, А. А. Зайцев и др. ; под ред. О. В. Белого. – СПб. : Наука, 2014. – 356 с.

Дата поступления: 15.01.2019

Решение о публикации: 23.01.2019

Контактная информация:

САТТОРОВ Самандар Бахтиерович – аспирант; satorovsamandar100@gmail.com

КОТЕНКО Алексей Геннадьевич – д-р техн. наук, профессор; uer@pgups.ru

БЕЛОЗЕРОВ Владимир Леонидович – д-р экон. наук, профессор; v.belozerov@mail.ru

Questions of development of the Ohangaron–Tukimachi–Sirdaryo railway line

S. B. Sattorov, A. G. Kotenko, V. L. Belozerov

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

For citation: Sattorov S. B., Kotenko A. G., Belozerov V. L. Questions of development of the Ohangaron–Tukimachi–Sirdaryo railway line. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 3, pp. 439–448. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-439-448 (In Russian)

Summary

Objective: Determine the paths of development of the Ohangaron–Tukimachi–Sirdaryo line based on modelling the carrying capacity curves and comparing it to the actual cargo traffic flow for rational regulation and rationing of train handling. **Methods:** The method of approximation was used to predict the growth dynamics of the carriage and traffic capacity on the line under consideration. **Results:** A forecasting model was developed that corresponds to the nature of change in the tendency of the studied cargo flow. The forecast will make it possible to foresee difficulties in transportation process, work out the phasing of development of the line to improve the carrying capacity of the station-to-station blocks, properly plan the work of transshipment points, and organise the rational use of railway vehicles. **Practical importance:** The Ohangaron–Tukimachi–Sirdaryo line is the main transit direction which affects the operation of the entire railway network of the Republic of Uzbekistan. Improving the line for passing transit and local cargo traffic will improve the competitiveness of the railway in the field of cargo traffic.

Keywords: Railway transport, throughput, cargo flow, forecasting, time series, least squares method.

References

1. Ilesaliev D. I., Koroviakovskii E. K. & Malikov O. B. Perevozka eksportno-importnykh gruzov v Respublike Uzbekistan [Transportation of export-import goods in the Republic of Uzbekistan]. *Proceedings of Petersburg Transport University*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2014, iss. 3 (39), pp. 11–17. (In Russian)

2. Os'minin A. T. Nauchnoe reshenie problem perevozhnogo protsessa [Scientific solution to the problems of transportation process]. *Zheleznodorozhnyi transport [Railway Transport]*, 2018, no. 12, pp. 12–17. (In Russian)

3. Gogoleva A. V. *Prognoz srednei uchastkovoi skrostiti dvizheniia gruzovykh poezdov na osnove stokhasticheskogo modelirovaniia [Forecasting average local speed of cargo trains on the basis of stochastic modelling]*. Diss. ...Cand. Sci. in Engineering, specialty:

05.22.08. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2012, 132 p. (In Russian)

4. Baturin A. P. & Shapkin I. N. Intellektualizatsiia upravleniia na stantsionnom urovne [Intellectualization of control at station level]. *Zheleznodorozhnyi transport [Railway Transport]*, 2012, no. 7, pp. 40–43. (In Russian)

5. Gromov N. N. & Persianov V. A. *Upravlenie na transporte. Uchebnik dlia vuzov [Management of transport. Textbook for universities]*. Moscow, Transport Publ., 1990, 336 p. (In Russian)

6. Efanov A. N., Kovalenok T. P. & Zaitsev A. A. *Otsenka ekonomicheskoi effektivnosti investitsii i innovatsii na zheleznodorozhnom transporte. Uchebnoe posobie [Evaluation of economic efficiency of investment and innovation in railway transport. Study guide]*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2001, 149 p. (In Russian)

7. Kozlov P.A., Kolokol'nikov V.S. & Tushin N.A. Raschet parametrov garmonicheskoi postroennoi seti zheleznykh dorog [Calculation of parameters of a harmoniously constructed railway network]. *Zheleznodorozhnyi transport [Railway Transport]*, 2018, no. 12, pp. 18–21. (In Russian)
8. Balzhir M. *Obosnovanie osvoeniia perspektivnykh ob'emov perevozok na mongol'skoi zheleznoi doroge [Rationale for development of projected traffic volumes on the Mongolian railway]*. Diss. ...Cand. Sci. in Engineering, specialty: 05.22.08. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2016, 128 p. (In Russian)
9. Levin D. Yu. & Sukhar'kov Yu. S. Kak povysit' effektivnost' raboty poezdnoho dispetchera [How to improve the efficiency of a train dispatcher's work]. *Zheleznodorozhnyi transport [Railway Transport]*, 2007, no. 11, pp. 8–14. (In Russian)
10. Borovkov A.A. *Matematicheskaiia statistika. Uchebnik [Mathematical statistics. Textbook]*. 4th ed., sr. Saint Petersburg, Lan' Publ., 2010, 704 p. (In Russian)
11. Bobrov Yu.A. & Loseva V.A. *Modelirovanie raboty transportnykh sistem. Instruktsiia pol'zovatelya [Modelling the work of transport systems. User manual]*. Saint Petersburg, Lengiprotrans Publ., 2008, 45 p. (In Russian)
12. Dubrova T.A. & Arkhipova M. Yu. *Statisticheskie metody prognozirovaniia v ekonomike [Statistical methods of forecasting in economics]*. Moscow, MGUESI [Moscow State University of Economics, Statistics and Informatics] Publ., 2004, 136 p. (In Russian)
13. Zamkovoii A.A. Strategicheskoe prognozirovanie ob'emov perevozki gruzov pri otsenke proektov stroitel'stva i razvitiia zheleznodorozhnoi infrastruktury [Strategic forecasting of cargo traffic volumes in the evaluation of construction projects and the development of railway infrastructure]. *Zheleznodorozhnyi transport [Railway Transport]*, 2018, no. 7, pp. 37–43. (In Russian)
14. Shapkin I.N., Yusipov R.A. & Kozhanov E.M. *Normirovanie i prognozirovanie na zheleznykh dorogakh (metody, algoritmy, tekhnologii, raschety) [Rationing and forecasting on railways (methods, algorithms, technologies, calculations)]*. Moscow, Transport Publ., 2006, 265 p. (In Russian)
15. Kossov V.V., Livshits V.N. & Shakhnazarov A.G. et al. *Metodicheskie rekomendatsii po otsenke effektivnosti investitsionnykh proektov [Guidelines for evaluating the effectiveness of investment projects]*. 2nd ed. Moscow, Ekonomika Publ., 2000, 421 p. (In Russian)
16. Belozero V.L., Efanov A.N., Zaitsev A.A. et al. *Ekonomika transporta: upravlenie v rynochnykh osloviakh. Monografiia [Economy of transport: management in market conditions. Monograph]*. Ed. by O.V. Belyi. Saint Petersburg, Nauka Publ., 2014, 356 p. (In Russian)

Received: January 15, 2019

Accepted: January 23, 2019

Author's information:

Samandar B. SATTOROV – Postgraduate Student; satorovsamandar100@gmail.com

Alexei G. KOTENKO – D. Sci. in Engineering, Professor; uer@pgups.ru

Vladimir L. BELOZEROV – D. Sci. in Economics, Professor; v.belozero@mail.ru

УДК 656.025.4

Совершенствование управления парком частных вагонов

Т. Г. Сергеева

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

Для цитирования: Сергеева Т. Г. Совершенствование управления парком частных вагонов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 3. – С. 449–454. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-449-454

Аннотация

Цель: Исследовать вопросы управления парком частных вагонов в современных условиях. Изучить рынок операторских компаний и структуру парка вагонов в их управлении. Оценить дефицит парка вагонов на станции погрузки. Выделить условия взаимодействия станции погрузки порожних вагонов и согласованного подвода порожнего вагонопотока на заданном интервале времени, а также условие обеспечения согласованного подвода порожнего подвижного состава с мест отстоя на станции погрузки в заданный промежуток времени. Составить критерий оценки несогласованности подвода порожнего вагонопотока. Сформулировать критерий оптимальности управления вагонами. **Методы:** Используется метод оперативного управления порожним вагонопотоком с возможностью прогнозирования оперативной ситуации, а также выбор наилучшего варианта перемещения груженых и порожних вагонов при минимальном рабочем парке вагонов. **Результаты:** Указана необходимость совершенствования управления парком вагонов. Описаны условия обеспечения согласованного подвода вагонов под погрузку. Установлена расчетная формула критерия оптимальности управления вагонами. **Практическая значимость:** Представлена методика определения критерия оптимальности управления вагонным парком операторской компании при подаче порожнего вагонопотока под погрузку.

Ключевые слова: Операторская компания, управление парком вагонов, подвод порожнего вагонопотока, условие согласованности подвода, критерий оптимальности управления парком вагонов.

Компании-операторы железнодорожного подвижного состава наряду с ОАО «РЖД» являются основными участниками перевозочного процесса. Они оказывают значительное влияние на транспортную отрасль и экономику страны в целом, так как эффективное управление вагонным парком всегда было приоритетной задачей в сфере железнодорожных перевозок. В настоящее время на рынке грузовых железнодорожных услуг работают более 300 компаний-операторов. При этом, согласно исследованиям [1, 2], среди владельцев подвижного состава действует монополистическая

конкуренция. В десятку крупнейших компаний входят такие как АО «ФГК», АО «ПГК», ООО «Восток 1520», АО ХК «Новотранс», АО «Русагротранс», АО «НефтеТрансСервис» и др. Они оперируют 429,786 тыс. вагонов грузового парка. По итогам 2018 г. на их долю приходится 69% парка грузовых вагонов. Распределение парка вагонов по их типам представлено на рис. 1.

В современных условиях процесс обеспечения погрузки вагонами зависит от времени подхода порожнего вагонопотока [3, 4]. Это вынуждает операторов создавать запас вагонов

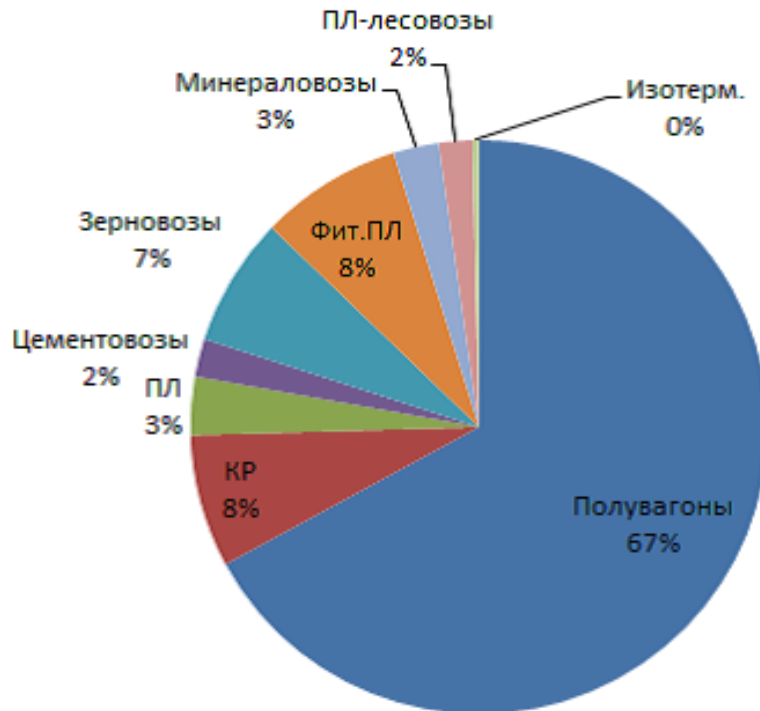


Рис. 1. Доля парка по типу вагонов

в местах погрузки [5]. Присутствие динамического резерва на станции отправления дает возможность обеспечить погрузку при образовании суточного дефицита вагонов [6, 7]. Однако неостребованный резерв вызывает неоправданно большие простои вагонов в ожидании погрузки [8]. Наличие неликвидного резерва крайне нежелательно, так как это приводит к снижению среднесуточной доходности вагона и сложностям работы станций [9].

Схема доставки порожнего вагонопотока может быть проиллюстрирована в виде графа (рис. 2), по ребрам которого проходит поток груза. Представим граф-модель перевозочного процесса следующим образом [10]. Станции погрузки – это вершины графа, составляют множество $K = \{K_1, K_2, \dots, K_N\}$, и направление перевозки грузов – множество дуг E . Ребрам сети присваивается одна или несколько числовых характеристик; например количество вагонов, время доставки, затраты на перевозку груза и пр.: $E = \{E_{12}, E_{21}, \dots, E_{15}, E_{51}\}$.

Таким образом, получаем граф-модель $V(K, E)$. Граф V ориентированный, так как

все дуги имеют направленность. Кроме того, граф – это ориентированный цикл, так как является замкнутой ориентированной цепью. По теории графов можно представить ее аналогично в виде матрицы перемещения $M = m_{ij}$. Матрица M имеет N строк (по одной на каждую вершину) и L столбцов (по одному на каждую дугу).

Строки матрицы являются совокупностью значений, обозначающих направления перевозки грузных и порожних вагонов, и векторами перемещения графа V . Задача сводится к выбору наилучшего варианта перемещения грузных и порожних вагонов при выполнении всех плановых перевозок грузов и при минимальном рабочем парке вагонов [11].

Предложенная граф-модель позволит оптимизировать логистику перемещения грузных и порожних вагонопотоков, снизить непроизводительные простои на инфраструктуре общего и необщего пользования в условиях множественности операторов подвижного состава.

В данной работе покажем, как можно обеспечить согласованный подвод порожнего

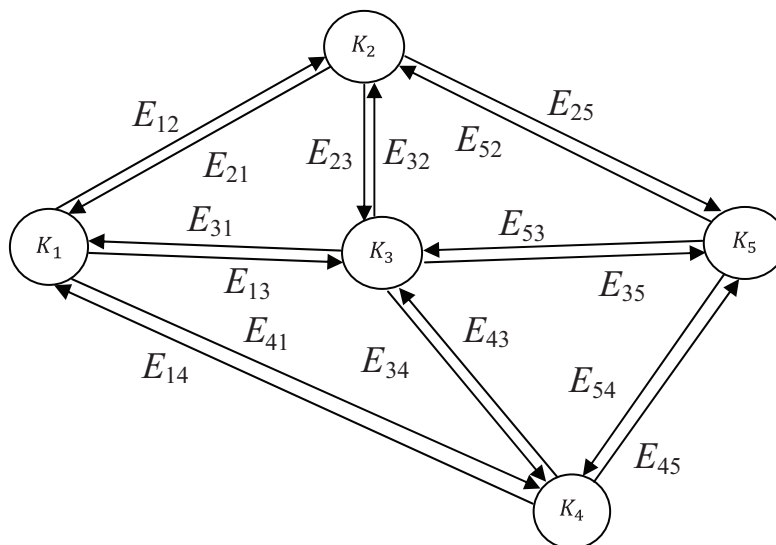


Рис. 2. Граф-модель перемещения вагонов

подвижного состава с мест отстоя на станции погрузки в заданный промежуток времени. Возможно использование опорных станций в регионах погрузки для оперативного перераспределения порожних вагонопотоков.

Условие взаимодействия i -й станции погрузки порожних вагонов и согласованного подвода порожнего вагонопотока на интервале времени $0 < t < \tau$ может быть записано через временные интервалы следующим образом:

$$T_{pi}(t) = T_{ni}(t + \tau_{zi}), \quad (1)$$

где $T_{pi}(t)$ – временной интервал подачи порожних вагонов на i -ю станцию погрузки в момент t ; $T_{ni}(t + \tau_{zi})$ – временной интервал погрузки порожних вагонопотоков на i -й станции в момент прибытия на станцию $t + \tau_{zi}$; τ_{zi} – длительность запаздывания порожних вагонов под погрузку на i -ю станцию (от момента отправления со станции отстоя порожних вагонов до момента прибытия на i -ю станцию погрузки).

Тогда критерий оценки несогласованности подвода порожнего вагонопотока на i -ю станцию погрузки, выраженный через соответствующие временные интервалы, равен

$$W_i [T_{pi}(t)] = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} [T_{pi}(t) - T_{ni}(t + \tau_{zi})]^2 dt, \quad (2)$$

$i = 1, 2, \dots, S(t).$

С учетом приоритетов отдельных станций погрузки

$$W [T_{p1}(t), T_{p2}(t), \dots, T_{ps}(t)] = \sum_{i=1}^{s(t)} W_i = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \sum_{i=1}^{s(t)} \{l_i [T_{pi}(t) - T_{ni}(t + \tau_{zi})]^2\} dt, \quad (3)$$

здесь l_i – коэффициент приоритета i -й станции, который назначается в зависимости от доли станции в общем объеме погрузки.

Критерий оптимальности управления W оценивает несогласованность погрузочного и транспортного комплексов на интервале времени $(0; \tau)$ с учетом приоритетов. В соответствии с этим условие оптимизации имеет вид

$$W [T_{p1}(t), T_{p2}(t), \dots, T_{ps}(t)] \rightarrow \min. \quad (4)$$

В соответствии с соотношениями (1)–(4) указанную задачу можно сформулировать так:

$$W \left[T_{p1}(t), T_{p2}(t), \dots, T_{ps}(t) \right] = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau s(t)} \sum_{i=1}^s \times \quad (5)$$

$$\times \{l_i [T_{pi}(t) - T_{ni}(t + \tau_{3i})]^2\} dt \rightarrow \min$$

при ограничении

$$\sum_{i=1}^{s(t)} \tau_{обi}(t + \tau_{3i}) T_{pi}(t) = m(t), \quad (6)$$

$$m(t) \leq m_0(t), \quad (7)$$

в котором $m_0(t)$ – количество вагонов, $\tau_{обi}$ – длительность подачи вагона на станцию погрузки.

Решение задачи (5)–(7) позволит сократить скопления порожних вагонов в местах погрузки, разработать метод оперативного управления порожним вагонопотоком с возможностью прогнозирования оперативной ситуации.

Запас вагонов на станции погрузки, динамический резерв и дефицит вагонов ставят перед оператором подвижного состава актуальную задачу определения оптимальной величины вагонного парка, находящегося в оперировании у операторской компании, что даст возможность предотвратить профицит и дефицит вагонов.

Библиографический список

1. INFOLine Rail Russia TOP, 2018. – N 2. – URL : <https://railtop.ru> (дата обращения : 25.03.2019).

2. Nikiforova G. I. Reserch of some management problems of rolling stock of the operation company / G. I. Nikiforova, T. G. Sergeeva, T. A. Malakhova // Intern. Scientific and Practical Conference World science. – 2016. – Vol. 1, N 10 (14). – P. 56–60.

3. Осьминин А. Т. Научное обоснование направлений повышения эффективности управления перевозочным процессом / А. Т. Осьминин // Бюл. Объед. Учен. совета ОАО «РЖД». – 2016. – № 3. – С. 28–40.

4. Осьминин А. Т. Развитие системы организации вагонопотоков с учетом политики клиентоориентированности / А. Т. Осьминин // Бюл. Объед. Учен. совета ОАО «РЖД». – 2017. – № 5–6. – С. 27–39.

5. Стерлигова А. Н. Управление запасами в цепях поставок : учебник / А. Н. Стерлигова. – М. : ИНФРА-М, 2013. – 430 с.

6. Никифорова Г. И. Исследование взаимодействия железнодорожного и морского транспорта в логистической цепи доставки внешнеторговых грузов / Г. И. Никифорова, Т. Г. Сергеева // Достижения и приложения современной информатики, математики и физики : материалы VII Всерос. науч.-практич. заочной конференции (г. Нефтекамск, 30 ноября 2018 г.). – Уфа : РИЦ БашГУ, 2018. – С. 75–89.

7. Никифорова Г. И. Исследование проблем деятельности операторских компаний в управлении вагонным парком / Г. И. Никифорова // Профессиональное образование, наука и инновации в XXI веке : сб. трудов XII С.-Петерб. конгресса. – СПб. : ПГУПС, 2018. – С. 172–173.

8. Хусаинов Ф. И. Операторы реагируют на стимулы / Ф. И. Хусаинов. – URL : https://f-husainov.livejournal.com/678379.html?utm_source=vksharing&utm_medium=social (дата обращения: 15.09.2019).

9. Салимова Т. А. Управление качеством : учебник / Т. А. Салимова. – М. : Омега-Л, 2013.

10. Никифорова Г. И. Совершенствование управления парком вагонов операторской компании / Г. И. Никифорова, Т. Г. Сергеева // Транспорт России : проблемы и перспективы–2015 : материалы Юбил. Междунар. науч.-практич. конференции. – СПб. : ПГУПС, 2015. – С. 215–220.

11. Стратегия развития Холдинга «РЖД» на период до 2030 года. – URL : <http://doc.rzd.ru> (дата обращения : 17.02.19).

Дата поступления: 16.09.2019

Решение о публикации: 24.09.2019

Контактная информация:

СЕРГЕЕВА Татьяна Георгиевна – канд. техн. наук, доцент; sergeeva@pgups.ru

Improvement of private wagons fleet management

T. G. Sergeeva

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

For citation: Sergeeva T. G. Improvement of private wagon fleet management. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 3, pp. 449–454. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-449-454 (In Russian)

Summary

Objective: Consider the problems of managing private wagon fleet in modern conditions; study the market of operator companies and the structure of wagon fleets under their management; study the deficit of wagon fleet at load stations; identify conditions for interaction between empty wagons' load station and coordinated supply of empty wagon flow in a specified amount of time, and the conditions for ensuring coordinated supply of empty rolling stock from layover location to load stations in a specified amount of time; identify criterion for evaluation of uncoordinated supply of empty wagon flows; formulate criterion of optimum wagon management. **Methods:** Methods of operational management of empty wagon flow suitable for forecasting, as well as of selection of the best possible option for transferring loaded and empty wagons with the smallest possible working wagon park. **Results:** The need for perfecting wagon park management is pointed out. Conditions for ensuring coordinated supply of wagons for loading are described. Calculation formula for criterion of optimum wagon management is set. **Practical importance:** A method for determining the criterion of optimum character of managing wagon fleet of an operator character in supplying empty wagon flow for loading is presented.

Keywords: Operator company, wagon fleet management, supply of empty wagon flow, condition of supply coordination, criterion of optimum character of managing wagon fleet.

References

1. *INFOLine Rail Russia TOP*, 2018, no. 2. Available at: <https://railtop.ru> (accessed: 25.03.2019).

2. Nikiforova G. I., Sergeeva T. G. & Malakhova T. A. Research of some management problems of rolling stock of the operation company. *International Scientific and Practical Conference World Science*, 2016, vol. 1, no. 10 (14), pp. 56–60.

3. Os'minin A. T. Nauchnoe obosnovanie napravlenii povysheniia effektivnosti upravleniia perevozhnym protsessom [Scientific rationale for directions of increasing efficiency of management of transportation process]. *Biulleten' Ob'edinennogo uchenogo soveta OAO RZhd [Bulletin of the United Academic Council of the Russian Railways JSC]*, 2016, no. 3, pp. 28–40. (In Russian)

4. Os'minin A. T. Razvitie sistemy organizatsii vagonopotokov s uchetom politiki klientoorientirovan-

nosti [Development of wagon flow organization system accounting for client-oriented approach]. *Biulleten' Ob'edinennogo uchenogo soveta OAO RZhd [Bulletin of the United Academic Council of the Russian Railways JSC]*, 2017, no. 5–6, pp. 27–39. (In Russian)

5. Sterligova A. N. *Upravlenie zapasami v tsepiakh postavok. Uchebnyk [Inventory management in supply chains. Study guide]*. Moscow, INFRA-M Publ., 2013, 430 p. (In Russian)

6. Nikiforova G. I. & Sergeeva T. G. Issledovanie vzaimodeistviia zheleznodorozhnogo i morskogo transporta v logisticheskoi tsepi dostavki vneshnetorgovykh грузов [A study into interaction of rail and maritime transport in logistical delivery chain of overseas cargo]. *Dostizheniia i prilozheniia sovremennoi informatiki, matematiki i fiziki. Materialy VII Vserorriiskoi nauchno-prakticheskoi zaochnoi konferentsii [Achievements and applications of modern information science, mathematics and physics. Coll. papers of the 7th All-*

Russian scientific and practical virtual conference (Nizhnekamsk, Nov. 30, 2018)]. Ufa: RITs BashGU [Editorial and publishing centre of the Bashkir State University] Publ., 2018, pp. 75–89. (In Russian)

7. Nikiforova G.I. Issledovanie problem deiatel'nosti operatorskikh kompanii v upravlenii vagonnym parkom [A study into working problems of operator companies in managing wagon fleet]. *Professional'noe obrazovanie, nauka i innovatsii v XXI veke. Sbornik trudov XII Sankt-Peterburgskogo kongressa* [Professional education, science and innovations in the 21st century. Coll. Papers of the 12th Saint Petersburg congress]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2018, pp. 172–173. (In Russian)

8. Khusainov F. I. *Operatory reagiruyut na stimuly* [Operators respond to incentives]. Available at: https://f-husainov.livejournal.com/678379.html?utm_source=vksharing&utm_medium=social (accessed: 15.09.2019).

9. Salimova T.A. *Upravlenie kachestvom*. Uchebnyk po spetsial'nosti "Menedzhment organizatsii" [Quality management. Study guide for corporate management students]. Moscow, Omega-L Publ., 2013, 376 p. (In Russian)

10. Nikiforova G.I. & Sergeeva T.G. Sovershenstvovanie upravleniia parkom vagonov operatorskoi kompanii [Perfecting the management of an operator company's wagon fleet]. *Transport Rossii: problemy i perspektivy–2015. Materialy Iubileinoi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Russia's transport: problems and perspectives–2015. Coll. papers of the Jubilee international scientific and practical conference]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2015, pp. 215–220. (In Russian)

11. *Strategiia razvitiia Kholdinga "RZhD" na period do 2030 goda* [Russian Railways group of companies development strategy through to 2030]. Available at: <http://doc.rzd.ru> (accessed: 17.02.2019). (In Russian)

Received: September 16, 2019

Accepted: September 24, 2019

Author's information:

Tat'iana G. SERGEEVA – Cand. Sci. in Engineering, Associate Professor; sergeeva@pgups.ru

УДК 621.01:539.4:656.21.001.2

О деформируемом состоянии механической системы «груз–вагон–крепление»

Х. Т. Туранов¹, Я. О. Рузметов², А. В. Якушев³

¹ Уральский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

² Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта, 100167, Ташкент, Республика Узбекистан, ул. Адылходжаева, 1

³ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Туранов Х. Т., Рузметов Я. О., Якушев А. В. О деформируемом состоянии механической системы «груз–вагон–крепление» // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2019. – Т. 16, вып. 3. – С. 455–468. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-455-468

Аннотация

Цель: Рассмотреть прикладную задачу по расчету усилий в гибких элементах крепления груза и деформированного вида груза и подкладок при движении поезда по кривым участкам пути с применением современных программных средств. Провести вычислительные эксперименты при вариациях значений массы груза, коэффициента трения, продольных, вертикальных и ветровых нагрузок в автоматизированном режиме с помощью разработанного подхода к определению усилий в гибких элементах крепления. **Методы:** Прикладная задача по расчету усилий в гибких элементах крепления груза на вагоне решена с применением программных средств. Расчет по определению усилий в гибких элементах крепления при маневровых соударениях вагонов выполнен в следующей последовательности: построение геометрии системы «груз–крепление–вагон», деление поверхностей на сетки конечных элементов. **Результаты:** Эксперименты показали, что за счет перераспределения усилий при перемещении груза по продольным и поперечным осям вагона происходит его поворот вокруг вертикальной оси при одновременном действии продольных, поперечных, вертикальных сил. Это дает возможность выбрать рациональный способ размещения гибких элементов крепления груза в автоматизированном режиме и соответственно внести изменения в действующие технические условия погрузки и крепления грузов. **Практическая значимость:** Предложенный подход в перспективе может быть использован для определения деформированного и нагруженного состояний груза и подкладок при движении поезда по кривым участкам пути от действия поперечных сил инерции и ветровых нагрузок как по боковым, так и по лобовым сторонам груза.

Ключевые слова: Перевозка груза, крепление груза в вагонах, загрузка вагона, деление поверхностей на сетки конечных элементов, вычислительные эксперименты.

Введение

Для обеспечения безопасности движения и сохранности перевозимых грузов большое значение имеет правильное размещение и

крепление грузов в вагонах. Как показывает анализ, случаи несохранности нередко происходят из-за загрузки вагона сверх установленной нормы, неравномерной погрузки в вагоне, развала вертикально погруженных изделий и

неправильной подготовки груза к перевозке, повреждения под действием динамических нагрузок при транспортировке и др.

По существующему техническому условию погрузки и крепления грузов [1, 2] выполняется упрощенный проверочный расчет крепления груза. До настоящего времени сделаны некоторые попытки по созданию метода расчета усилий в креплениях груза от действия продольных, поперечных и вертикальных сил [3–9] с использованием возможностей современных вычислительных средств MathCAD, выполняя следующее:

- ввод исходных данных (технико-эксплуатационные характеристики вагона, геометрические параметры гибких элементов крепления и груза, масса, скорость движения вагона, коэффициент трения соприкасающихся поверхностей груза и пола вагона, усилия предварительных закруток гибких элементов крепления);

- непосредственное вычисление усилий в гибких элементах крепления грузов с помощью аналитических выражений, полученных в [7–9], и возможностей вычислительной среды MathCAD [7].

Однако не выполнены расчеты по определению усилий в гибких элементах крепления груза с применением возможностей программных продуктов (для примера см. [10]).

В связи с этим расчет усилий в гибких элементах крепления груза с использованием программных средств является приоритетной и актуальной прикладной задачей, имеющей важное значение для федерального железнодорожного транспорта и транспортной науки. Такой подход к расчету усилий в гибких элементах крепления груза, несомненно, внесет весомый вклад в развитие основ теории погрузки и крепления грузов на открытом подвижном составе.

Методы решения

Прикладная задача по расчету усилий в гибких элементах крепления груза на вагоне

решена с помощью программных средств (для примера см. [10]).

Расчет по определению усилий в гибких элементах крепления при маневровых соударениях вагонов выполнен в такой последовательности:

- построение геометрии системы «груз–крепление–вагон»;

- деление поверхностей на сетки конечных элементов;

- задание свойств материалов груза, гибкого элемента крепления и подкладки. Например, параметры груза из железобетона: модуль упругости $E = 32,5 \cdot 10^6$ кН/м², коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$ и плотность $\gamma = 2,5$ т/м³. Параметры подкладок из дерева (дуб): модуль упругости $E = 1,1 \cdot 10^7$ кН/м², коэффициент Пуассона $\nu = 0,1$ и плотность $\gamma = 0,69$ т/м³ [5];

- задание постоянных параметров (реальных констант) – гибкого элемента крепления, груза и подкладки. Геометрические размеры гибких креплений: диаметр $d = 0,006$ м; проекции гибких элементов крепления на продольную ось $a_1 = a_6 = 0,395$, $a_2 = a_7 = 0,695$, $a_3 = a_8 = 0,345$, $a_4 = a_9 = 0,275$, $a_5 = a_{10} = 2,034$; проекции гибких элементов крепления на поперечную ось $b_1 = b_2 = b_3 = b_4 = b_6 = b_7 = b_8 = b_9 = 0,435$, $b_5 = b_{10} = 0,935$; проекции гибких элементов крепления на вертикальную ось $h_1 = h_2 = h_3 = h_4 = h_6 = h_7 = h_8 = h_9 = 2,1$, $h_5 = h_{10} = 1,54$. Здесь цифры 1, ..., 10 – номера гибких элементов крепления;

- задание граничных условий (закрепление растяжек и подкладок);

- задание усилий начальных натяжений гибких элементов крепления. Начальные натяжения растяжек различные и колеблются в пределах от 16 до 26,5 кН ($S_{01} = 25,5$, $S_{02} = 18,5$, $S_{03} = 23$, $S_{04} = 21$, $S_{05} = 20,5$, $S_{06} = 24$, $S_{07} = 16$, $S_{08} = 19,5$ (с правой стороны груза), $S_{01a} = 19,5$, $S_{02a} = 21,5$, $S_{03a} = 25$, $S_{04a} = 16$, $S_{05a} = 26,5$, $S_{06a} = 22,5$, $S_{07a} = 24$, $S_{08a} = 19$ (с левой стороны груза)).

Особо отметим, что «Технические условия размещения и крепления грузов в вагонах и креплениях» не учитывают усилия началь-

ных натяжений гибких элементов, значения которых колеблются в широких пределах, например от 16 до 26,5 кН [7]. Данные способствуют прижатию груза через подкладки к полу вагона, приводя к большему удержанию груза от сдвигающих сил. В связи с этим учет таких усилий является обязательным этапом вычислений.

Для учета усилий начальных натяжений гибкого элемента крепления необходимо рассчитать удлинение его от заданных значений усилий начальных натяжений по общеизвестной формуле Гука: $\Delta l = f(S_0, l, EA)$ [5], где S_{0i} и l_i – усилие начального натяжения (в кН) и длина (в м) гибкого элемента крепления соответственно; EA – жесткость на растяжение гибкого элемента крепления, кН ($2,262 \cdot 10^3$ кН) [7]. Затем следует определить удлинение гибкого элемента крепления в зависимости от изменения температуры окружающей среды по общеизвестной формуле из курса физики: $\Delta l_i = f(\alpha, l, \Delta t)$, в которой α – коэффициент линейного расширения материала гибкого элемента крепления, $1/\text{град.}$ ($12 \cdot 10^{-6} 1/\text{град.}$); Δt – изменение температуры окружающей среды, град. Поскольку от действия усилия начального натяжения гибкого элемента крепления происходит укорачивание этого элемента, то, приравнявая полученные выше соотношения и учитывая, что разность температур, вызывающая начальное натяжение гибкого элемента, равна удлинению от усилий начальных натяжений данного элемента с отрицательным знаком, из условия совместности деформации находим [5]

$$\Delta t_i = -\frac{S_{0i} l_i}{\alpha l_i EA_i}.$$

Результаты расчетов по учету усилий начальных натяжений гибких элементов крепления были выполнены в вычислительной среде MathCAD. Приведем их в виде макета-документа:

– заданные значения усилий предварительных натяжений гибких элементов, кН:

S01 := 25.5 S02 := 18.5 S03 := 23
 S07 := 24 S08 := 16 S01a := 19.5
 S05a := 26.5 S06a := 22.5 S07a := 24
 S04 := 21 S05 := 20.5 S06 := 22.5
 S02a := 21.5 S03a := 25 S04a := 16
 S08a := 19;

– вычисленные значения длин гибких элементов, м: $l_1 = 2,971$, $l_2 = 3,313$, $l_3 = 1,405$, $l_4 = 1,952$, $l_5 = l_1$, $l_6 = l_2$, $l_7 = l_3$, $l_8 = l_4$;

– рассчитанные значения удлинений от заданных усилий предварительных натяжений гибких элементов, м:

$$\Delta l1 := \frac{S01 \cdot l1}{E \cdot A} \quad \Delta l2 := \frac{S02 \cdot l2}{E \cdot A} \quad \Delta l3 := \frac{S03 \cdot l3}{E \cdot A}$$

$$\Delta l1 = 0.033 \quad \Delta l2 = 0.027 \quad \Delta l3 = 0.014$$

$$\Delta l7 = 0.015 \quad \Delta l8 = 0.014 \quad \Delta l1a = 0.026$$

$$\Delta l4a = 0.014 \quad \Delta l5a = 0.035 \quad \Delta l6a = 0.033$$

$$\Delta l4 := \frac{S04 \cdot l4}{E \cdot A} \quad \Delta l5 := \frac{S05 \cdot l5}{E \cdot A} \quad \Delta l6 := \frac{S06 \cdot l6}{E \cdot A}$$

$$\Delta l4 = 0.018 \quad \Delta l5 = 0.027 \quad \Delta l6 = 0.033$$

$$\Delta l2a = 0.031 \quad \Delta l3a = 0.016$$

$$\Delta l7a = 0.015 \quad \Delta l8a = 0.016;$$

– подсчитанные значения заданных отрицательных температур, град.:

$$\Delta t1 := \frac{-\Delta l1}{\alpha \cdot l1} \quad \Delta t2 := \frac{-\Delta l2}{\alpha \cdot l2}$$

$$\Delta t1 = -939.456 \quad \Delta t2 = -681.566$$

$$\Delta t5 = -755.249 \quad \Delta t6 = -828.932$$

$$\Delta t1a = -718.408 \quad \Delta t2a = -792.091$$

$$\Delta t5a = -976.298 \quad \Delta t6a = -828.932$$

$$\Delta t3 := \frac{-\Delta l3}{\alpha \cdot l3} \quad \Delta t4 := \frac{-\Delta l4}{\alpha \cdot l4}$$

$$\Delta t3 = -847.353 \quad \Delta t4 = -773.67$$

$$\Delta t7 = -884.194 \quad \Delta t8 = -589.463$$

$$\Delta t3a = -921.036 \quad \Delta t4a = -589.463$$

$$\Delta t7a = -884.194 \quad \Delta t8a = -699.987.$$

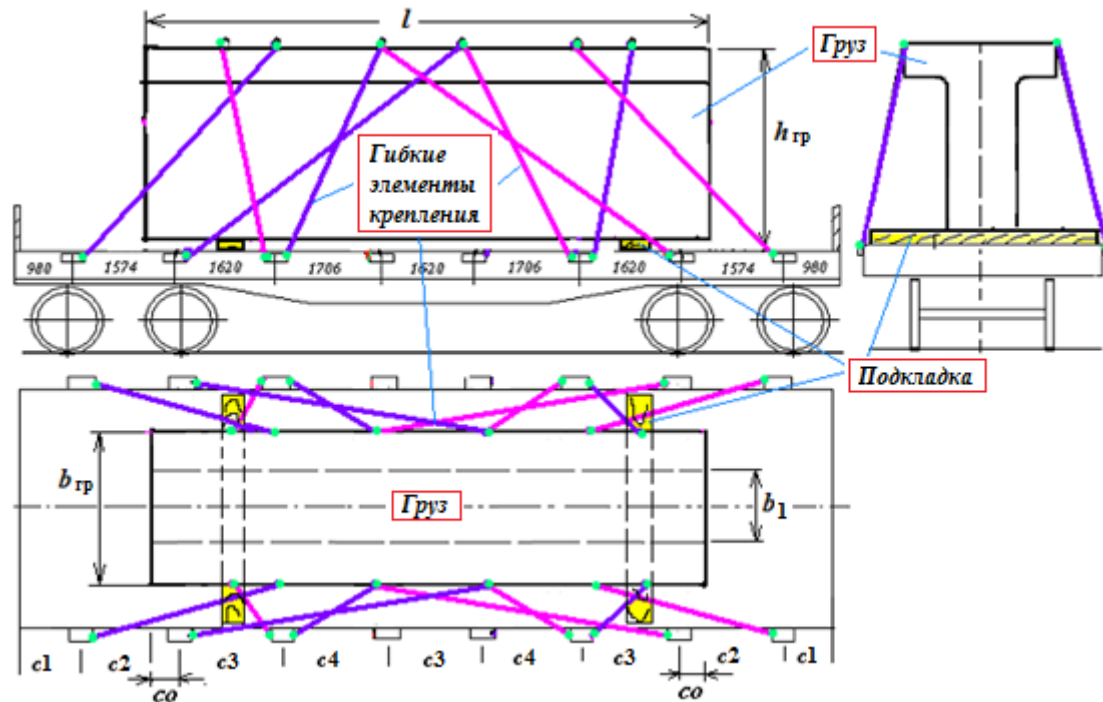


Рис. 1. Схема погрузки и крепления груза

Схема размещения и крепления груза на платформе приведена на рис. 1.

Результаты решения и их анализ

Построение геометрии системы «груз–крепление–вагон», деление поверхностей на сетки конечных элементов и другие действия выполнены в следующей последовательности.

Постановка и описание граничных условий

Для примера приведем отдельные случаи расчета (см. [10]). Так, в частности, заходим в меню **GEOMETRY**:

1. Выбрать команду **Plane**, которая задает плоскость, параллельную одной из плоскостей декартовой системы координат. Выбранная команда выглядит так: **PLANE, Z, 0, 1**. Затем перейти к команде **Grid On** (рисует сетку в активной плоскости): **GRIDON, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 30, 30, 2**. Здесь цифры 0,1 и 0,1 показывают размеры каждой клетки, м (10×10 см), а цифры 30 и 30 – число клеток сетки.

2. Создать геометрию половины груза (в случае симметрии) в фронтальной плоскости заданием необходимых точек по координатам, взятым из схемы погрузки и крепления груза. При этом использовать команды **Points – Define**: **PT, 1, 1, 5, 0, 0...PT, 10, 1, 9, 0, 0**. Здесь первые цифры 1,...,10 означают номера точек по порядку, а 1,5,...,1,9, 0,...,0 и 0,...,0 – значения координат X , Y и Z . Если возникнет необходимость пометить номера точек, то следует выполнить следующие действия: **Status 1 – Pt** (квадратик следует пометить мышкой) – **Save – Auto**.

3. Соединить между собой близлежащие точки, применяя команды **Curves – Liner with 2 Pts**: **CRLINE, 1, 1, 2...CRLINE, 9, 10, 1**, где первые цифры 1,...,9 означают номера кривых, 1,2,...,10,1 – номера точек, между которыми проходят кривые (здесь прямая, как частный случай кривой). Чтобы соединить две близлежащие точки, следует мышкой по два раза щелкнуть на начальную и конечную точки.

4. Построить фаску, используя команды **Curves – Manipulation – Fillet**: **CRFILRT, 10, 4, 5, 0, 1** (остальные цифры присваиваются по

умолчанию). Здесь цифра 10 присвоена машиной. Цифры 4 и 5 – номера кривых, между которыми следует провести фаску, цифра 0.1 – радиус фаски, которую принимаем из чертежа груза. В результате между кривыми 4 и 5 получаем фаску с радиусом 0,1 м (10 см).

5. Создать поверхности по точкам с помощью команд **Manipulation – Break near Pt**: CRPTBRK, 1, 9, 0. Здесь цифра 1 означает номер кривой, на которой необходимо пометить новую точку, которая будет лежать напротив точки, например 9, на переходной кривой. Перенумеруем кривые через **Status 1 – CR** (квадратик следует пометить мышкой) – **Save – Auto**. Повторяя команды, имеем: CRPTBRK, 8, 8, 0. Еще раз повторяя команды, получим: CRPTBRK, 2, 8, 0, и на фигуре увидим появление кривой под номером 10. Затем стираем номера кривых через **Status 1 – CR** (следует убрать мышкой пометку из квадратика) – **Save – Auto**.

6. Создать поверхности по двум кривым, используя команды **Surfaces – Define by 2 Cr**: SF2CR, 1, 1, 5, 0. Здесь цифра 1 означает номер первой поверхности, следующая цифра 1 – номер первой кривой, а цифра 5 – номер второй. В итоге получим закрашенный прямоугольник, т. е. поверхность № 1, которая построена между кривыми 1 и 5. Такие действия повторим столько раз, сколько необходимо построить поверхностей. При необходимости следует перенумеровать кривые, стирая их после использования.

Деление поверхностей на сетки конечных элементов

Необходимо зайти в меню **MESHING**. Для обеспечения непрерывности соединения узлов между собой деление поверхностей в порядке возрастания их номеров является обязательным. При этом применяется команда **Parametric – Mesh Surfaces**: M_SF,1,1,1,4,8,4,1,1; M_SF,2,2,1,2,4,1,1; M_SF,3,3,1,4,4,4,1,1; M_SF,4,4,1,4,4,4,1,1 и т. д.

Например, после того, как вошли в меню **MESHING**:

1. Для обеспечения непрерывности соединения узлов между собой деление поверхностей в порядке возрастания их номеров обязательно. При этом используется команда **Parametric – Mesh Surfaces**: M_SF,1,1,1,4,8,4,1,1; M_SF,2,2,1,2,4,1,1; M_SF,3,3,1,4,4,4,1,1; M_SF,4,4,1,4,4,4,1,1 и т. д. Здесь цифра 1 означает номер первой поверхности, следующая цифра 1 – номер первой кривой, а цифра 5 – номер второй кривой. В итоге получим закрашенный прямоугольник, т. е. поверхность № 1, которая построена между кривыми 1 и 5. В результате увидим фигуру, разделенную на сетки конечных элементов.

2. Выбрать локальную систему координат, применяя которую можно поворачивать фигуру относительно выбранной оси координат, например относительно оси x . Для этого используем команду **Geometry – Coordinate Systems – 3 Points**: CSYS, 3,0,1,6,2. Здесь цифра 1 означает номер первой точки, с которой совпадает начало *локальной системы координат*; 6 – номер шестой точки, через которую проходит ось x , и 2 – номер второй точки, через которую проходит ось y .

3. Поворачивать фигуру относительно оси x с помощью команды **Meshing – Elements – Generation – Symmetry**: ELSYM,1,10000,1, X,1,0. Здесь 10000 – любое большое число. В результате получим повернутую относительно плоскости $y-z$ фигуру, разделенную на сетки конечных элементов.

4. Выполнить объединение близлежащих узлов, используя команду **Meshing – Nodes – Merge**: NMERGE,1,220,1,0.001,0,1,0. Здесь все цифры появляются по умолчанию.

5. Произвести сжатие узлов, применяя команду **Meshing – Nodes – Compress**: MCOMPRESS,1,220,... Здесь все цифры также появляются по умолчанию.

6. Произвести сжатие элементов при помощи команды **Meshing – Elements – Compress**: ECOMPRESS,1,144, ... Здесь все цифры также появляются по умолчанию.

7. Произвести вытягивание (протягивание) фигуры по его длине по оси z , применяя коман-

ду **Meshing – Elements – Generation – Extrusion**: ELEXTR,1,10 000,1, Z -,9.1,30,1,1. Здесь 10 000 – любое большое число. В результате получим повернутую относительно плоскости $y-z$ фигуру, разделенную на сетки конечных элементов.

Результаты деления поверхностей груза и подкладок на сетки конечных элементов представлены на рис. 2. При этом вид сверху, с торца и с боку показаны соответственно на рис. 2, а–в. Задание ветровых нагрузок на боковую поверхность груза иллюстрирует рис. 3.

После задания свойств материалов груза, гибкого элемента крепления и подкладки следует выполнить задания их постоянных параметров: выполняем *закрепление растяжек и подкладок* (рис. 4). Для этого используем меню **Loads BC**, подменю **Structural – Displacement** и команду **Define by Nodes**: DND,1, AL, 0,10 000,1.

Значения начальных натяжений растяжек различные и колеблются в пределах от 16 до 26,5 кН.

На практике при маневровых соударениях вагонов возникают ускорения, которые превышают 1g. В данном случае принимали ускорения от 1,1 до 2g [3, 4, 7]. Для этого используем меню **Loads BC**, подменю **Structural – Gravity** и команду **Define Acceleration**: ACEL,0, 0, -g. Значение 1g по продольной оси равно минимальной величине ускорения, при которой работают те растяжки, направление закрепления которых совпадает с направлением действующей силы инерции. Противоположно расположенные растяжки при этом не испытывают нагрузку.

Для подготовки к расчету усилий в гибких элементах крепления используем меню **Analysis**, подменю **Static** и команду **Static Analysis Option**.

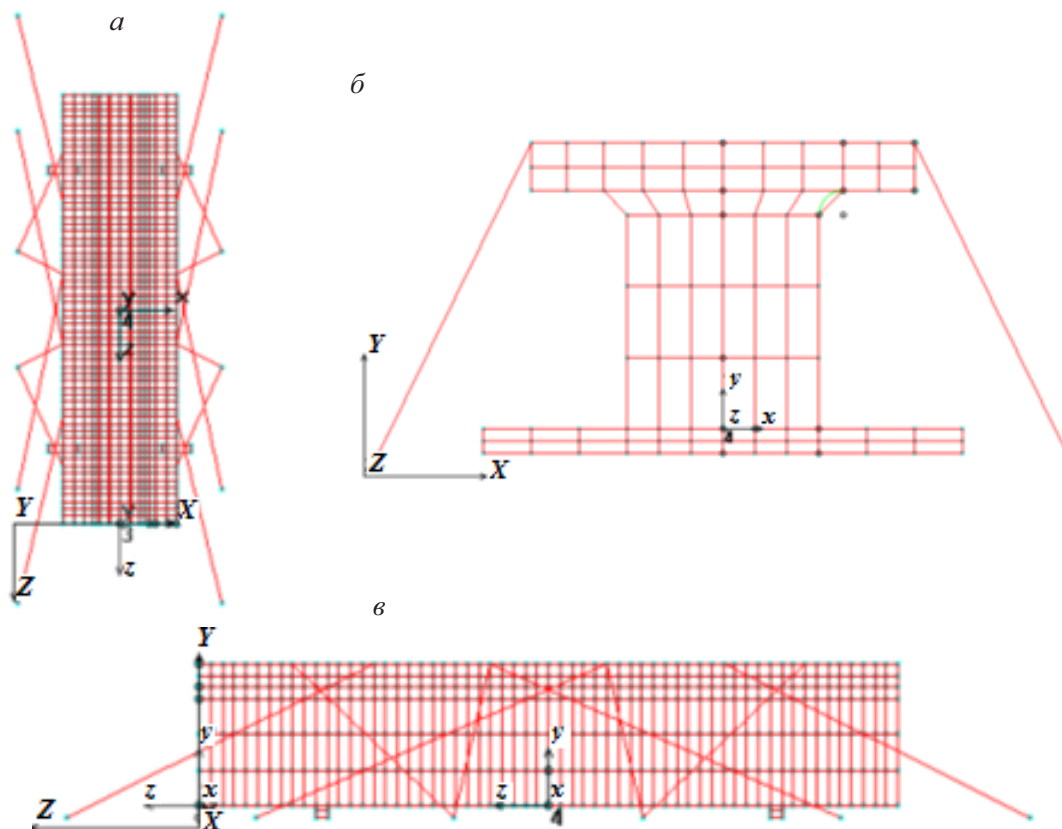


Рис. 2. Деление поверхностей груза и подкладок на сетки конечных элементов:
а – вид сверху; б – вид сбоку; в – вид с торца

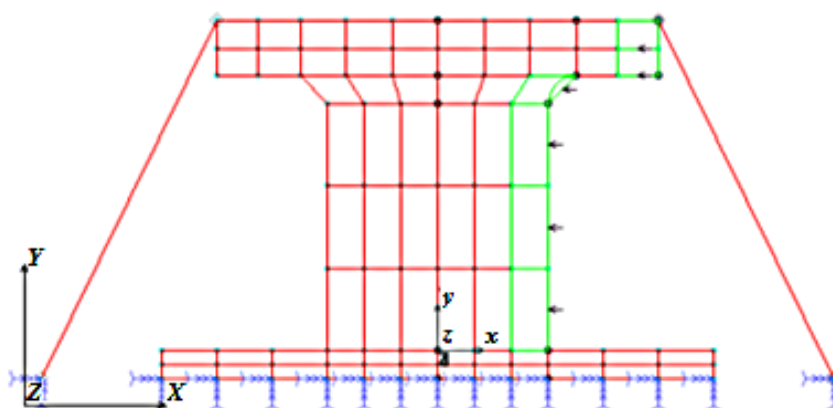


Рис. 3. Задание ветровых нагрузок на боковую поверхность груза

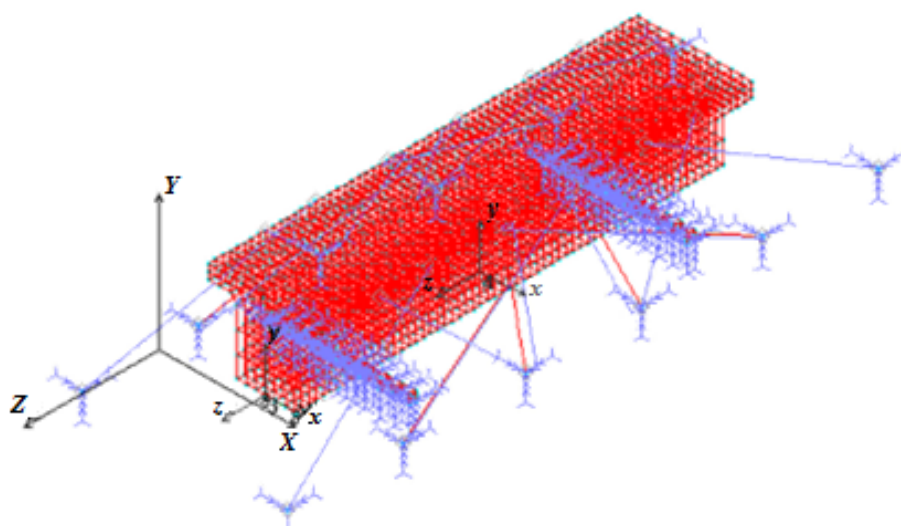


Рис. 4. Закрепление растяжек и подкладок

Для расчета усилий в гибких элементах крепления при маневровых соударениях вагонов применим меню **Analysis**, подменю **Static** и команду **Run Static Analysis**.

Вывод на экран дисплея деформированного вида груза и гибких элементов крепления (анимация) проведем с помощью меню **Results**, подменю **Plot** и команду **Animate**.

Анализ деформированного вида груза (рис. 5) показывает, что прокладки размещены по длине груза нерационально. Это приводило к прогибу груза. Кроме того, видны деформации груза вблизи монтажных петель, поскольку они по длине груза также расположены нерационально.

Вывод на экран дисплея перемещений в гибких элементах крепления

Для этого используем меню **Results**, подменю **Plot** и команду **Displacement: ACTDIS, 1, UZ, 0; DISPLOT, 0 ...** (рис. 6).

Значение перемещений при этом незначительны – до 0,03 мм. Анализируя результаты расчетов, убеждаемся, что от действия продольных сил инерции гибкие элементы крепления в основном удлиняются вблизи точек закрепления с монтажными петлями груза, от действия центробежных сил и ветровых нагрузок вблизи точек закрепления с монтажны-

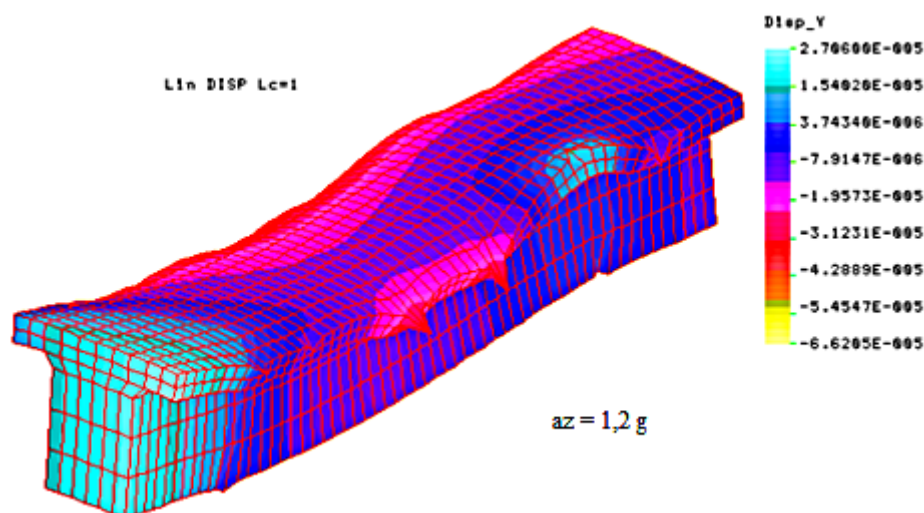


Рис. 5. Деформированный вид груза по вертикальной оси



Рис. 6. Перемещения в гибких элементах крепления

ми петлями груза. Кроме того, происходит поворот груза вокруг его продольной оси (рис. 7).

Вывод на экран дисплея эпюры нормальных напряжений в гибких элементах крепления

Для этого используем меню **Results**, подменю **Plot** и команду **Stress: ACTSTR, 1, VON, 1, 1, 0, 0; STRPLOT, 0, 1, 2704,...** (рис. 8).

Анализ эпюр нормальных напряжений в гибких элементах крепления показывает, что максимальные их значения возникают в пологих (длинных) растяжках в сечениях, расположенных вблизи монтажных петель, что соответствует результатам работ [4, 7]. При принятых исходных данных нормальные напряжения в гибких элементах крепления незначительны – достигают всего 5149 кПа, а усилия в растяжке с диаметром 6 мм и числом нитей 8 ($A = 2,62 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$) – $5149 \cdot 2,62 \cdot 10^{-4} = 1,35 \text{ кН}$.

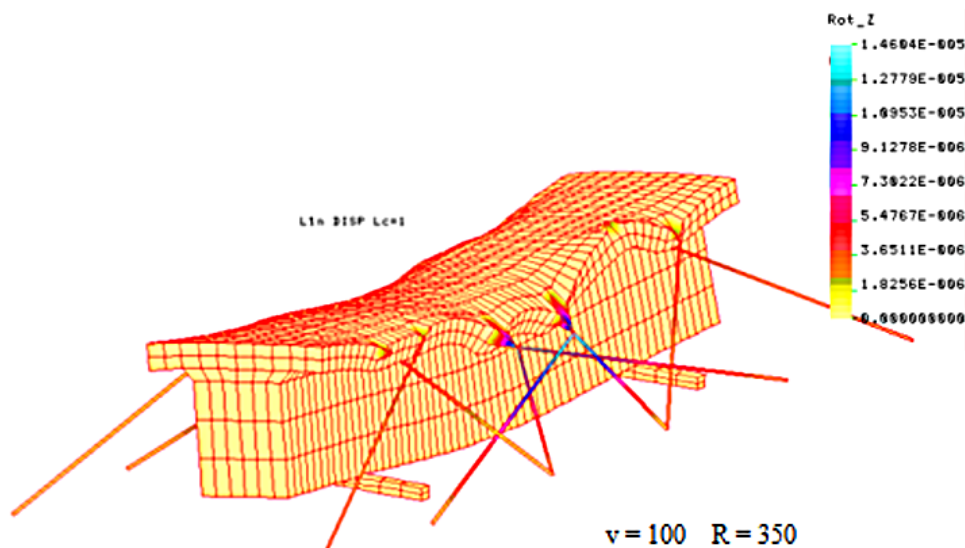


Рис. 7. Поворот груза и перемещение в гибких элементах крепления

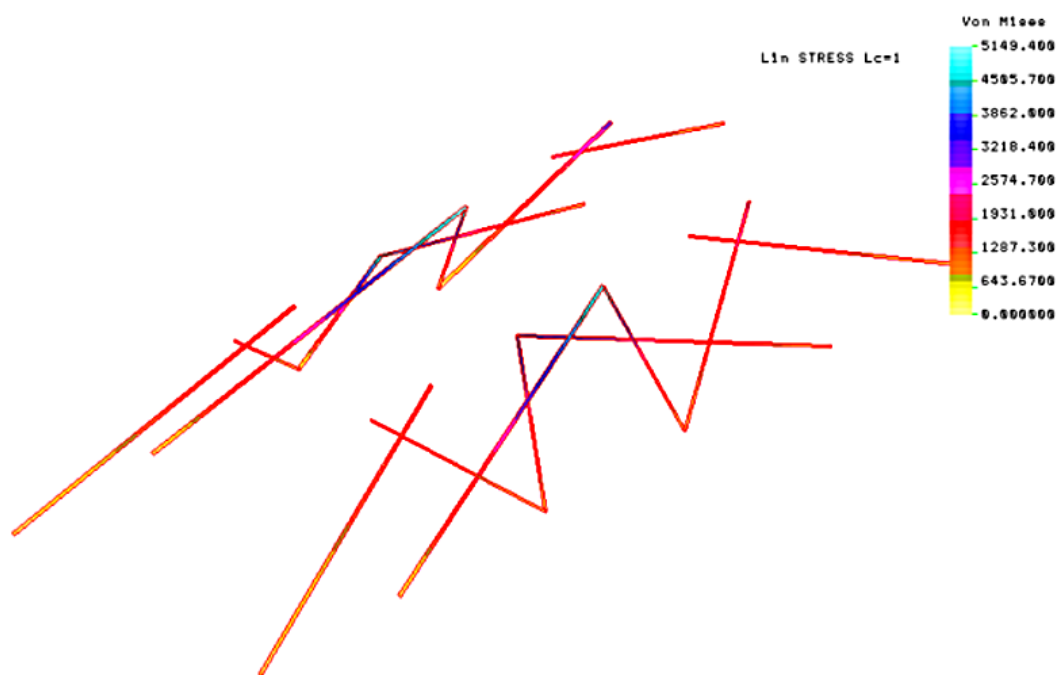


Рис. 8. Эпюры нормальных напряжений в гибких элементах крепления

Анализ зависимостей нормальных напряжений по длине растяжек показывает, что растяжки, расположенные с правой стороны вагона, менее нагружены, чем с левой стороны. Кроме того, такой фактор также свидетельствует о возможном повороте груза относительно продольной и поперечной осей симметрии вагона, что также отмечено в [7]. Это объясняется различными значениями усилий предварительных

натяжений растяжек, которые колеблются в пределах от 16 до 26,5 кН.

Таким образом, для определения усилий в гибких элементах крепления груза вначале необходимо создать геометрию системы «груз–крепление–вагон» и осуществить задание значений усилия предварительных (начальных) натяжений гибких элементов крепления, что является достаточно длительным

процессом сравнительно со временем, затрачиваемым на расчет какого-либо параметра системы. После этого достаточно изменить лишь исходные данные, например значения продольного ускорения, получая непосредственно результаты расчета, не прибегая к каким-либо дополнительным действиям, делая такой способ расчета современным.

Вывод на экран дисплея деформированного вида груза и подкладок (анимация)

Для этого используем меню **Results**, подменю **Plot** и команду **Animate** (рис. 9).

Анализ деформированного вида системы «груз–крепление–подкладка» показывает, что

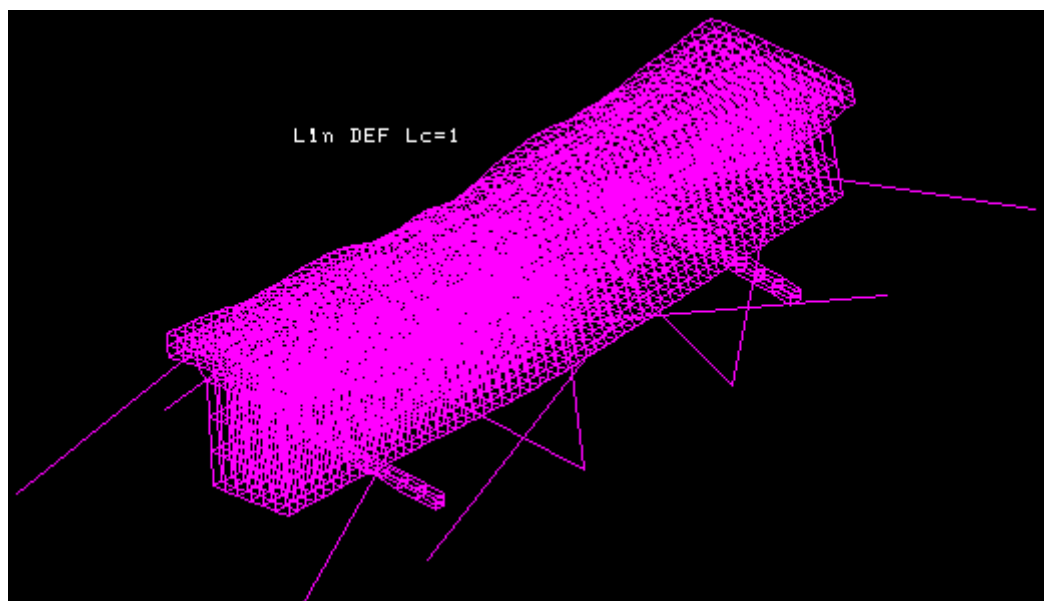


Рис. 9. Деформированный вид системы «груз–крепление–подкладка»

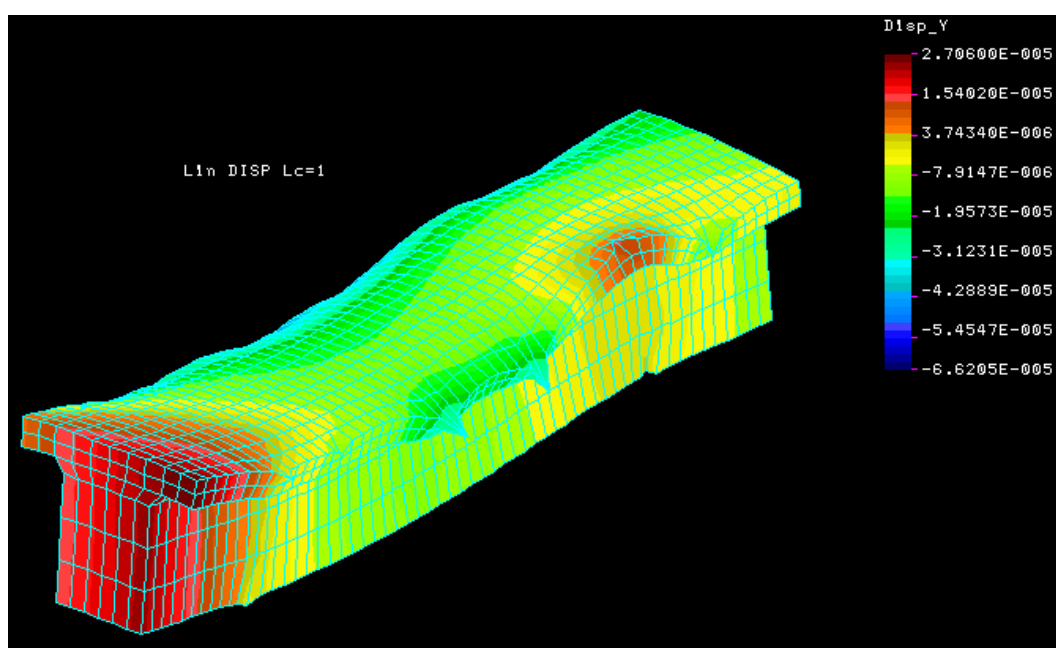


Рис. 10. Деформированный вид груза по вертикальной оси

между прокладками происходит прогиб груза из-за того, что они размещены по его длине нерационально.

Вывод на экран дисплея деформированного вида груза

Деформированный вид груза по продольной оси и вертикали при ускорении маневрового соударения вагонов, равном 1,2g [3, 4, 7], соответственно показан на рис. 10.

Анализируя результаты расчетов по определению деформированного вида системы «груз–крепление–подкладка», убеждаемся, что от действия продольных сил инерции в основном деформируются те места поверхности груза, которые находятся вблизи точек закрепления гибких элементов крепления с монтажными петлями. Это показывает на то, что монтажные петли по длине груза также размещены нерационально.

Величины перемещений по продольной и вертикальной осям достигают 0,02 мм. Кроме того, выявлено, что деформируются не только поверхности груза со стороны монтажных петель, но и нижние поверхности, расположенные между подкладками.

Вывод на экран дисплея эпюр нормальных напряжений, возникающих на поверхности груза

Эпюры нормальных напряжений на поверхности груза по Мизесу (что равносильно *четвертой* теории прочности [5]) приведены на рис. 11. Их анализ показывает, что максимальные значения этих напряжений возникают вблизи монтажных петель, находящихся в середине длин груза. При принятых исходных данных нормальные напряжения по Мизесу незначительны – изменяются до 5150 кПа.

Анализируя результаты этих исследований, также убеждаемся, что возможен поворот груза относительно вертикальной плоскости, поскольку большему нагружению подвергнуты четыре передних гибких элемента крепления, находящихся с правой стороны груза, и столько же задних креплений – с его левой стороны.

Анализ результатов исследований

Анализ результатов по определению усилий в гибких элементах крепления показал, что в работу по удержанию груза от продольного

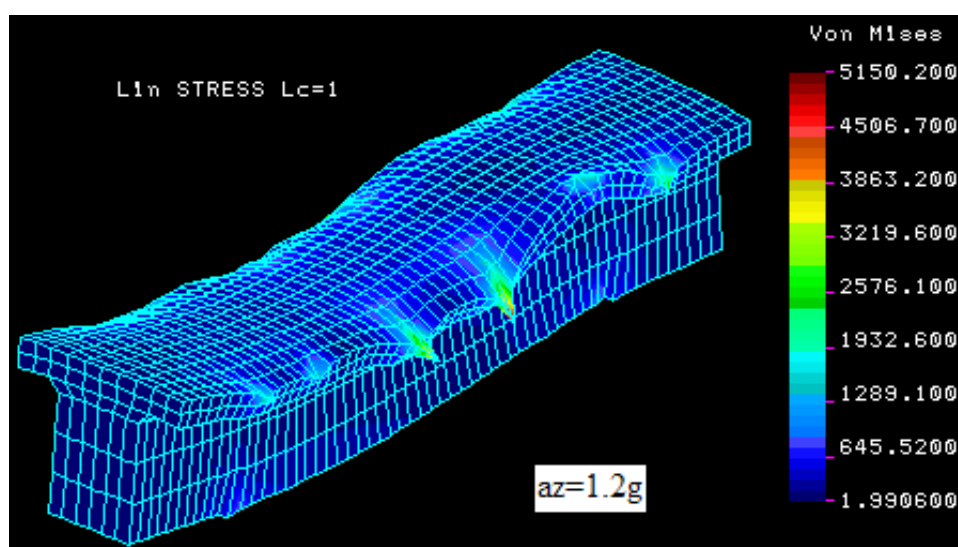


Рис. 11. Эпюры нормальных напряжений в гибких элементах крепления по Мизесу

и поперечного сдвигов включаются и гибкие элементы крепления, расположенные противоположно направлению действующих сил.

Таким образом, выявлено ранее неизвестное в теории погрузки и крепления груза явление включения в работу по удержанию груза от сдвига также гибких элементов крепления, расположенных противоположно направлению действующих сил.

Кроме того, отметим, что для определения усилий в гибких элементах крепления груза достаточно изменить лишь исходные данные, не прибегая к каким-либо дополнительным действиям, что делает такой способ расчета современным. Разработанный способ расчета усилий в креплениях груза позволяет выполнить вычислительные эксперименты с целью рационального выбора схем крепления и размещения груза на открытом подвижном составе при любых вариациях исходных данных, что является неоспоримым преимуществом такого способа расчета. Предложенный способ расчета крепления груза также вносит существенный вклад в развитие основ теории крепления и погрузки грузов.

Заключение

Разработанный подход к определению усилий в гибких элементах крепления позволил провести вычислительные эксперименты при вариациях значений массы груза, коэффициента трения, продольных, вертикальных и ветровых нагрузок в автоматизированном режиме. Результаты экспериментов показали, что за счет перераспределения усилий при перемещении груза по продольным и поперечным осям вагона возникает его поворот вокруг вертикальной оси при одновременном действии продольных, поперечных, вертикальных сил. Это дает возможность выбрать рациональный способ размещения гибких элементов крепления груза в автоматизированном режиме и соответственно внести изменения в действующие технические условия погрузки и крепления грузов.

Данный подход в перспективе может быть применен для определения деформированного и нагруженного состояний груза и подкладок при движении поезда по кривым участкам пути от действия поперечных сил инерции и ветровых нагрузок как по боковым, так и по лобовым сторонам груза.

Библиографический список

1. Технические условия размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах. – М. : Юртранс, 2003. – 544 с.
2. Приложение 14 к СМГС «Правила размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах». – М. : Планета, 2008. – 191 с.
3. Вершинский С.В. Динамика вагона / С.В. Вершинский, В.Н. Данилов, В.Д. Хусидов. – М. : Транспорт, 1991. – 360 с.
4. Зылев В.Б. Вычислительные методы в нелинейной механике конструкций / В.Б. Зылев. – М. : Науч.-исслед. центр «Инженер», 1999. – 145 с.
5. Беляев Н.М. Соппротивление материалов / Н.М. Беляев. – М. : Наука, 1976. – 608 с.
6. Anderson N. Equipment for rational securing of cargo on railway wagons / N. Anderson, R. Bylander, S. Petersen // Bob Zether MariTerm AB. VINNOVA Report/Rapport VR 2004:05. – URL : <http://www.vinnova.se/upload/EPiStorePDF/vr-04-05.pdf> (дата обращения : 20.06.2019).
7. Туранов Х.Т. Теоретическая механика в задачах грузовых перевозок : монография / Х.Т. Туранов. – Новосибирск : Наука, 2009. – 376 с.
8. Turanov Kh. Analytical investigation of cargo motion lengthwise the wagon under the action of plane force system / Kh. Turanov // Global Journal of Researches in Engineering : A Mechanical and Mechanics Engineering (New York). – 2013. – Vol. 13, iss. 10. – Version 1.0 Year. – P. 7–16.
9. Turanov Kh. Mathematical modeling of cargo motion crosswise the wagon under the action of plane force system / Kh. Turanov // Science and Technology. – 2015. – Vol. 5, N 1. – P. 5–14. – DOI: 10.5923/j.scit.2015.0501.02
10. Елизаров С.В. Современные методы расчета инженерных конструкций на железнодорожном

транспорте. Метод конечных элементов и программа COSMOS/M : учеб. пособие для студентов вузов ж.-д. транспорта / С. В. Елизаров, А. В. Бенин, О. Д. Тананайко. – СПб. : ПГУПС, 2002. – 226 с.

Дата поступления: 21.06.2019

Решение о публикации: 02.07.2019

Контактная информация:

ТУРАНОВ Хабибулла Туранович – д-р техн. наук, профессор; khturanov@yandex.ru

РУЗМЕТОВ Ядгор Озодович – канд. техн. наук, доцент; yadgor.ruzmetov@yandex.ru

ЯКУШЕВ Алексей Вячеславович – канд. техн. наук, доцент; av-yakushev@ya.ru

On deformable state of the “cargo–wagon–fastening” mechanical system

Kh. T. Turanov¹, Ya. O. Ruzmetov², A. V. Yakushev³

¹ Ural State University of Railway Transport, 66, Kolmogorova ul., Yekaterinburg, 620034, Russian Federation

² Tashkent Railway Engineering Institute, 1, Adilxojayev ul., Tashkent, 100167, Republic of Uzbekistan

³ Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Turanov Kh. T., Ruzmetov Ya. O., Yakushev A. V. On deformable state of the “cargo–wagon–fastening” mechanical system. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 3, pp. 455–468. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-455-468 (In Russian)

Summary

Objective: Consider an applied problem for calculation of strain in flexible elements of cargo fastening and deformed shape of the cargo and bearing surfaces during train movement on curved track using modern software. Conduct simulation experiments with variable values of cargo weight, friction coefficient, longitudinal, vertical and wind load in automated regime. Use developed method to determine strain in flexible elements of fastening. **Methods:** Applied problem for calculation of strain in flexible elements of cargo fastening on the wagon was solved using software applications. Calculation for determination of strain in flexible elements of fastening during shunting collision of wagons was conducted in the following order: composition of the geometry of the “cargo–fastening–wagon” system, splitting of surfaces into finite element grids. **Results:** Experiments indicated that by redistributing efforts during transportation of cargo along longitudinal and lateral axes of the wagon, its turn around the vertical axis occurs with concurrent action of longitudinal, lateral and vertical forces. Study results allow selection of a rational method for distribution of flexible elements of cargo fastening in automated regime and accordingly make amendments to the existing technical conditions of loading and fastening of cargoes. **Practical importance:** The approach proposed can be applied in the future to defining deformed and loaded state of cargo and bearing surfaces during train movement through curved track from the influence of lateral inertia forces and wind loads by side and front faces of the cargo.

Keywords: Cargo transportation, fastening of cargo in wagons, wagon loading, splitting surfaces into finite element grids, simulation experiments.

References

1. *Tekhnicheskie usloviia razmeshcheniia i krep- leniia Грузов в вагонах и контейнерах [Technical conditions for allocation and fastening of cargoes in wagons and containers]*. Moscow, Yurtrans Publ., 2003, 544 p. (In Russian)
2. *Pravila razmeshcheniia i krep- leniia Грузов в вагонах и контейнерах [Rules for allocation and fastening cargoes in wagons and containers]*. Supplement N 14 to the Agreement on International Goods Transport by Rail. Moscow, Planeta Publ., 2008, 191 p. (In Russian)
3. Vershinskii S. V., Danilov V. N. & Khusidov V. D. *Dinamika vagona [Wagon dynamics]*. Moscow, Transport Publ., 1991, 360 p. (In Russian)
4. Zylev V. B. *Vychislitel'nye metody v nelineinoi mekhanike konstruktssii [Computational methods in non-linear structural mechanics]*. Moscow, NITs Inzhener Publ., 1999, 145 p. (In Russian)
5. Beliaev N. M. *Soprotivlenie materialov [Strength of materials]*. Moscow, Nauka Publ., 1976, 608 p. (In Russian)
6. Anderson N., Bylander R. & Petersen S. Equipment for rational securing of cargo on railway wagons. *Bob Zether MariTerm AB. VINNOVA Report/Rapport VR 2004:05*. Available at: <http://www.vinnova.se/upload/EPiStorePDF/vr-04-05.pdf> (accessed: 20.06.2019).
7. Turanov Kh. T. *Teoreticheskaiia mekhanika v zadachakh gruzovykh perevozok. Monografiia [Theoretical mechanics in cargo transportation problems. Monograph]*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2009, 376 p. (In Russian)
8. Turanov Kh. Analytical investigation of cargo motion lengthwise the wagon under the action of plane force system. *Global Journal of Researches in Engineering. A Mechanical and Mechanics Engineering* (New York), 2013, vol. 13, iss. 10. Version 1.0 Year, pp. 7–16.
9. Turanov Kh. Mathematical modeling of cargo motion crosswise the wagon under the action of plane force system. *Science and Technology*, 2015, vol. 5, no. 1, pp. 5–14. DOI: 10.5923/j.scit.20150501.02
10. Elizarov S. V., Benin A. V. & Tananaiko O. D. *Sovremennye metody rascheta inzhenernykh konstruktssii na zheleznodorozhnom transporte. Metod konechnykh elementov i programma COSMOS/M. Uchebnoe posobie dlya studentov vuzov zheleznodorozhnogo transporta [Modern methods for engineering structural analysis in railway trainsport. Finite elements methods and COSMOS/M program. Study guide for railway university students]*. Saint Petersburg, PGUPS [Peterburg State Transport University] Publ., 2002, 226 p. (In Russian)

Received: June 21, 2019

Accepted: July 02, 2019

Author's information:

Khabibulla T. TURANOV – Dr. Sci. in Engineering, Professor; khturanov@yandex.ru

Yadgor O. RUZMETOV – Cand. Sci. in Engineering, Associate Professor; yadgor.ruzmetov@yandex.ru

Aleksei V. YAKUSHEV – Cand. Sci. in Engineering, Associate Professor; av-yakushev@ya.ru

УДК 621.313

Диагностика теплового состояния якоря тягового электродвигателя постоянного тока

М. А. Шрайбер

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

Для цитирования: Шрайбер М. А. Диагностика теплового состояния якоря тягового электродвигателя постоянного тока // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 3. – С. 469–477. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-469-477

Аннотация

Цель: Рассмотреть вопрос о повышении надежности тяговых электрических машин постоянного тока. Изучить тепловое состояние коллектора тягового электродвигателя (ТЭД) тепловоза в эксплуатации на примере ТЭД типа ЭД-118А. Проанализировать полученные результаты исследования. Дать рекомендации по определению фактической температуры коллектора ТЭД. **Методы:** В качестве основного метода исследования и расчета температурных полей выбран метод конечных элементов, реализуемый в программном пакете SolidWorks 2005. **Результаты:** Выявлена необходимость совершенствования методов диагностирования теплового состояния электрических машин тепловозов в эксплуатации. Установлено, что нужно совершенствование системы охлаждения ТЭД, а именно внедрение систем регулирования, способных изменять расход охлаждающего воздуха, подаваемого в ТЭД. Для повышения достоверности результатов расчета следует учитывать регион работы ТЭД, особенно это касается участков обращения тепловозов, в которых обнаружены тяжелые условия эксплуатации. Оценена необходимость проведения дополнительного изучения теплового состояния электрических машин. **Практическая значимость:** Показаны необходимость дальнейшего изучения фактического теплового состояния ТЭД, а также корректировка методов определения температуры коллектора электрической машины постоянного тока. Это позволит повысить точность определения температуры вращающихся частей ТЭД, предупредить их возможный перегрев в эксплуатации, тем самым продлив их ресурс и снизив вероятность возникновения внезапных отказов. Предложенные методики могут быть рекомендованы к практическому использованию.

Ключевые слова: Тяговый электродвигатель постоянного тока, тепловое состояние коллектора тягового электродвигателя, процессы нагревания электрической машины.

Введение

На современном тяговом подвижном составе наибольшее распространение в качестве тяговых электродвигателей (ТЭД) получили электрические машины постоянного тока. Однако их эксплуатация при значительных перепадах температур усугубляется резкими изменениями скоростей движения локомоти-

вов, вызывающими резкое изменение нагрузок двигателей, их частоты вращения, толчки и вибрацию. Большие нагрузки, частые пуски приводят к нагреву якорных обмоток и тепловому разрушению изоляции [1]. Неравномерность распределения охлаждающего воздуха внутри двигателя, снижение его количества, различия в нагрузках оси и диаметров бандажей колесных пар, расхождение скоростных

характеристик двигателей приводят к неравномерному перегреву коллектора, обмоток якоря и полюсных катушек.

Наиболее типичной, приводимой в литературных источниках, температурно-временной зависимостью, используемой в практических расчетах температуры перегрева обмоток электрических машин, является экспонента, формально соответствующая классической теории нагрева однородного тела при следующей дополнительной оговорке: асимптота этой зависимости представляет собой характерное (максимальное или среднее) превышение температуры тела над минимальной температурой охлаждающей среды в пределах рассматриваемой системы:

$$T = T_{\infty}(1 - e^{-\tau/T_{\text{я}}}), \quad (1)$$

где T_{∞} – установившееся значение температуры обмотки, °С; $T_{\text{я}}$ – тепловая постоянная времени якоря, с.

Экспоненциальная зависимость широко применяется в практике тяговых расчетов и обеспечивает определение температуры перегрева с погрешностью 15–18% для следующих элементов электрических машин: активных деталей с конечной, в том числе и сравнительно низкой, теплопроводностью (пакеты активной стали, нажимные плиты, многослойные полюсные катушки и пр.) без ограничения по условиям конвективного теплообмена на охлаждаемых поверхностях; обмоток с косвенным охлаждением при объеме изоляционного материала, не превосходящем объем проводников; обмоток с непосредственным воздушным охлаждением.

Замечено, однако, что выражение (1) можно распространить на многие объекты, далеко не удовлетворяющие классическим предпосылкам, при условии, что под величиной T_{∞} принимается установившееся среднее или максимальное превышение температуры нагреваемого тела над наименьшей температурой охлаждающей среды.

Практические расчеты производятся с помощью кривых нагревания и остывания элект-

рических машин, которые получили широкое распространение, в частности, при выполнении тяговых расчетов.

Практика исследований и расчетов нестационарных тепловых процессов позволяет сформулировать приближенные решения для всех перечисленных случаев, основываясь на упрощенных представлениях классической теории нагрева однородного тела. Указанные модели достаточно наглядны, отражают в основном особенности физического процесса изменения температуры во времени и в то же время просты по форме и удобны для практического применения, хотя обладают низкой точностью вычислений и могут использоваться преимущественно для качественной оценки температуры отдельных элементов ТЭД.

Современное состояние науки измерений дает возможность по-новому подойти к проблеме контроля теплового состояния якоря ТЭД. Промышленность выпускает большую номенклатуру мобильных и компактных приборов для бесконтактного измерения температуры в реальном масштабе времени. На их основе можно создавать измерительно-управляющие комплексы любой степени сложности, в том числе для диагностики теплового состояния и поддержания температуры обмотки якоря ТЭД в эксплуатации [2, 3].

Для решения поставленной задачи по изучению теплового состояния и выработки рекомендаций по диагностике теплового состояния ТЭД в эксплуатации необходимо разработать математическую модель объекта диагностирования. В качестве объекта исследования был выбран фрагмент якоря ТЭД, а именно коллекторные пластины ТЭД типа ЭД-118А. Целями математического моделирования являются построение кривых нагревания при различных значениях протекающего тока, а также выработка рекомендаций по установке измерительного комплекса, позволяющего произвести диагностику ТЭД.

Для реализации поставленной задачи следует построить конечно-элементную модель пластины коллектора в программном пакете

SolidWorks 2015. Для этого были использованы размеры и чертежи ТЭД типа ЭД-118А.

Моделирование теплового состояния коллектора ТЭД

Первым этапом исследования теплового состояния ТЭД было создание твердотельной модели, предполагающей анализ распределения тепловых полей по поверхности фрагмента якоря ТЭД [4–6].

Так как якорь ТЭД постоянного тока является составным телом, то в общем виде можно записать следующую систему дифференциальных уравнений, описывающую распределение температуры в его элементах:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{c_i \rho_i} \times \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_i \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_i \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_i \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + \frac{w}{c_i \rho_i} \quad (2)$$

В (2) T – температура, К; x, y, z – координаты, м; τ – время, с; λ_i – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К; c – удельная теплоемкость, Дж/кг·К; ρ – плотность твердого тела, кг/м³; w – удельная производительность внутренних источников теплоты, Вт/м³.

Для анализа влияния величины протекающего в проводниках тока на температуру пластин коллектора был использован программный пакет SolidWorks 2005. В нем был смоделирован фрагмент коллектора тягового двигателя ЭД-118А. В качестве исходных данных был выбран часовой режим нагревания для величин тока 872, 730, 580, 350 и 250 А. Фрагмент твердотельной модели в среде SolidWorks 2005 представлен на рис. 1.

Результаты расчета фрагмента коллектора, состоящего из одной медной пластины и двух изоляционных пластин при токах 872 и 730 А, приведены на рис. 2, а, б.

В результате расчета с использованием программного пакета SolidWorks 2005 были определены значения температуры поверхностей фрагмента коллектора. На основании этих данных были построены зависимости нагревания электрической машины (а именно поверхности коллектора) от времени, представленные на рис. 3.

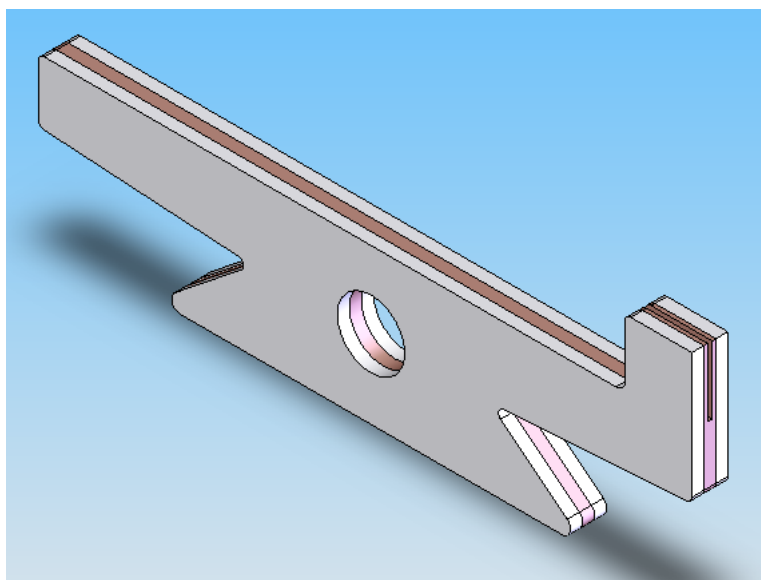


Рис. 1. Пластины коллектора ТЭД типа ЭД-118А

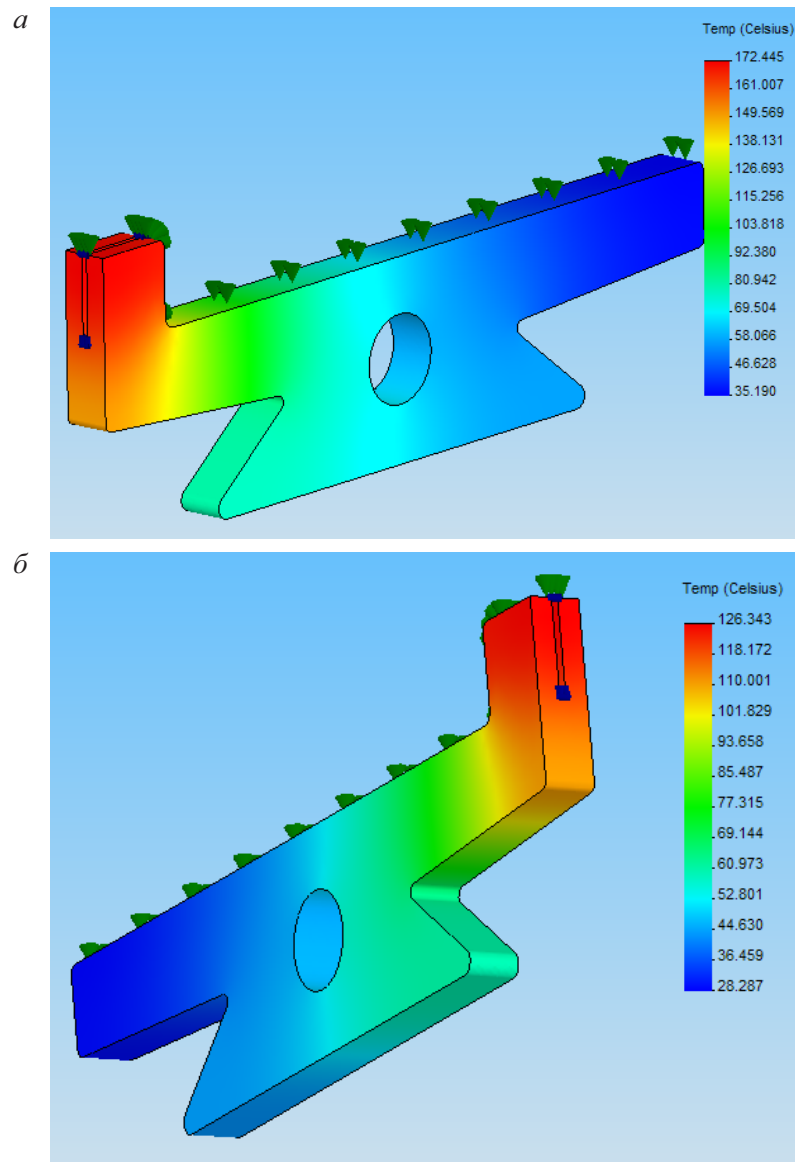


Рис. 2. Температурная эпюра для часового тока величиной 872 (а) и 730 А (б)

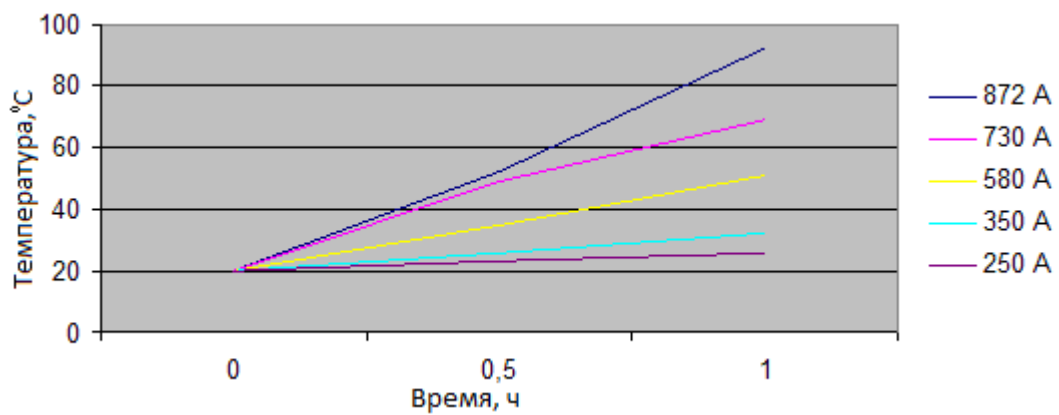


Рис. 3. Кривые нагрева коллектора ТЭД типа ЭД-118А при различных величинах часового тока

Такие кривые выражают изменение температуры поверхности коллектора при условии протекания часового тока и номинального расхода охлаждающего воздуха при движении тепловоза с расчетной скоростью. Большая часть теплоты рассеивается в окружающую среду из-за того, что наличие изоляционных прокладок значительной толщины препятствует проникновению теплоты в тело якоря и корпус коллектора. По этой причине температура данных элементов больше определяется теплопередачей со стороны якорной обмотки, чем тепловым состоянием коллектора.

Рекомендации по применению бортовых систем диагностирования ТЭД

Сложностью при внедрении бортовых систем диагностирования ТЭД является необходимость расчета температуры вращающихся частей. При измерении температуры вращающихся частей электрических машин связь между датчиками температуры и измерительными устройствами осуществляется обычно через скользящие электрические контакты или бесконтактным способом. Бесконтактная передача информации с датчика температуры на измерительное устройство может проводиться с помощью методов индуктивной, емкостной,

радиотелеметрической, а также оптической связи. Такую информацию позволяет получать инфракрасный (ИК) пирометр. Сравнительные характеристики ИК-пирометров, поставляемых производителями на современный рынок, представлены в табл. 1.

Для решения поставленной задачи наиболее подходит ИК-пирометр «Кельвин». Его технические характеристики приведены в табл. 2. Данный пирометр позволяет определять температуру поверхностей объектов диагностирования, имеющих наименьшие размеры по сравнению с пирометрами других моделей. (Это видно по такой характеристике пирометра как показатель визирования.) ИК-пирометр «Кельвин» предназначен для бесконтактного измерения температуры поверхности. Он применяется для контроля теплового режима оборудования (электрораспределительных устройств, промышленных печей, двигателей, редукторов, букс железнодорожных вагонов и т. п.), а также для точного измерения температуры в технологических процессах металлургии, машиностроения, нефтехимии и т. д.

Применение бесконтактных измерителей температуры элементов якоря во время испытаний или эксплуатации ТЭД дает возможность использовать их информацию не только для оценки степени нагрева, но и для контроля качества коммутации. И в случае ее нарушения позволяет получать оперативную информацию о возникновении механических или электри-

ТАБЛИЦА 1. Сравнительный анализ характеристик ИК-пирометров

Модель пирометра	Диапазон измеряемых температур, °С	Оптическое соотношение	Точность, %
Unit UT301C	От –18 до +550	12:1	1,8
Кельвин Компакт 1000Д	От –50 до +1000	100:1	1
Mastech MS6522B	От –20 до +500	10:1	0,5
ADA TemPro 300	От –32 до +350	12:1	2
ADA TemPro-pocket	От –30 до +250	6:1	2

ТАБЛИЦА 2. Технические данные ИК-пирометра «Кельвин»

Характеристика прибора	Значение
Диапазон измеряемых температур, °С	–30...–200; –30...–500; –30...–600; –10...–1100
Разрешение по температуре, °С	1
Время измерения, с	1
Показатель визирования	1:100
Диапазон установки излучательной способности	0,01–1,00
Спектральный диапазон, мкм	8–14
Выходной цифровой интерфейс, бод	RS2329600
Габаритные размеры, мм	111×40×40
Степень защиты от пыли и влаги	IP65

ческих неисправностей ТЭД, проявляющихся как нарушение коммутации.

Заключение

Разработанная конечно-элементная модель тепловых процессов в коллекторе ТЭД, реализованная в программном пакете моделирования SolidWorks 2005, достаточно полно отражает физическую сущность нагрева отдельных элементов якоря при исследовании нагрева при часовом режиме работы. Для повышения надежности работы ТЭД при разработке режимных карт вождения поездов и выполнении тяговых расчетов необходимо учитывать тепловые потоки связи коллектора и обмотки якоря. Проверка теплового состояния ТЭД должна производиться по пиковым значениям температуры нагрева, которые свойственны отдельным его элементам, особенно при нестационарных режимах работы тепловоза. Также предложена к внедрению в локомотивных депо на базе существующей микропроцессорной системы управления технология бесконтактной непрерывной оценки теплового состояния ТЭД, позволяющая определять превышение температуры лимитирующей по нагреву об-

мотки якоря при изменяющемся количестве охлаждающего воздуха и отслеживать ее перегрев при нарушениях в режимах управления тепловозом и вождении поездов повышенной длины и веса, что обеспечивает увеличение надежности их работы в эксплуатации [7–10].

Библиографический список

1. Грищенко А. В. Электрические машины и преобразователи подвижного состава : учебник для студентов учреждений среднего профессионального образования / А. В. Грищенко, В. В. Стрекопытов. – М. : Издат. центр «Академия», 2005. – 320 с.
2. Грищенко А. В. Экспериментальные исследования теплового состояния коллектора ТЭД / А. В. Грищенко, В. В. Грачев, Ф. Ю. Базилевский, М. А. Шрайбер // Локомотивы. Электрический транспорт. XXI век : Материалы VI Междунар. науч.-технич. конференции, посвященной 90-летию со дня рождения доктора технических наук, профессора кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС А. В. Плакса : сб. статей. – СПб. : ПГУПС, 2018. – С. 124–129.
3. Космодамианский А. С. Автоматическое регулирование температуры обмоток тяговых электриче-

ских машин локомотивов : монография / А. С. Космодамианский. – М. : Маршрут, 2005. – 256 с.

4. Кручек В. А. Перспективы использования титановых сплавов для теплонапряженных деталей / В. А. Кручек, П. В. Дворкин // Бюл. результатов науч. исследований. – 2016. – Вып. 1. – С. 67–71.

5. Дворкин П. В. Методика построения температурных полей деталей цилиндрической группы // Бюл. результатов науч. исследований. – 2017. – Вып. 4. – С. 14–17.

6. Шрайбер М. А. Моделирование теплового состояния тяговых электродвигателей постоянного тока / М. А. Шрайбер // Бюл. результатов науч. исследований. – 2014. – Вып. 4 (13). – С. 36–38.

7. Грищенко А. В. Основы теории систем автоматического регулирования : учеб. пособие для студентов / А. В. Грищенко, В. В. Грачев, Ф. Ю. Базилевский, М. А. Шрайбер. – СПб. : ПГУПС, 2017. – Ч. 1. – 172 с.

8. Базилевский Ф. Ю. Мультимедийный учебник «Элементы автоматических систем» // Ф. Ю. Базилевский, В. В. Грачев, А. В. Грищенко, Д. Н. Курилкин, М. А. Шрайбер. – Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RUS 2015610565 30.09.2014. – СПб. : ПГУПС, 2014. – 124 с.

9. Грищенко А. В. Повышение эффективности технического обслуживания локомотивов // А. В. Грищенко, В. В. Грачев, В. А. Кручек, М. А. Шрайбер // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2012. – Вып. 4 (33). – С. 93–97.

10. Грищенко А. В. Изменение системы технического обслуживания локомотивов / А. В. Грищенко, В. В. Грачев, Д. Н. Курилкин, М. А. Шрайбер // Наука и образование транспорту. – 2017. – № 1. – С. 25–27.

Дата поступления: 04.02.2019
Решение о публикации: 13.02.2019

Контактная информация:

ШРАЙБЕР Марина Александровна – канд. техн.

наук, доцент; goshapti4ka@yandex.ru

Diagnosis of the thermal state of the rotor of a direct-current electric traction motor

M. A. Schreiber

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

For citation: Schreiber M. A. Diagnosis of the thermal state of the rotor of a direct-current electric traction motor. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 3, pp. 469–477.

DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-469-477 (In Russian)

Summary

Objective: To consider the question of improving reliability of direct-current electric traction machines, study the thermal state of a collector of an electric traction motor of a locomotive in operation on the example of ED-118A type traction electric motor, analyse results of the study, and provide recommendations for determining the actual temperature of a traction electric motor collector. **Methods:** The finite elements method implemented in the SolidWorks 2005 software package was chosen as the main method of research and calculation of temperature fields. **Results:** The necessity of improving the methods of diagnosing the thermal state of electric traction motors of locomotives in operation is indicated. It is established that it is necessary to improve the cooling system of an electric traction motors, namely the introduction of control systems that can change the flow of cooling air supplied to the electric machine. To improve the reliability of the calculation results the region where the electric traction motors is operated should

be taken into account, especially for areas of operation of locomotives where severe operating conditions were registered. The need for additional study of the thermal state of electric traction motors is evaluated.

Practical importance: The need for further study of the actual thermal state of an electric traction motor and for adjustment of methods for determining the temperature of the collector of an electric DC machine is demonstrated. This will improve the accuracy of determining the temperature of the rotating parts of an electric traction motor, prevent them from overheating in operation, there by extending their life and reducing the likelihood of sudden failures. The proposed methods for determining the thermal state of an electric traction motor can be recommended for practical use.

Keywords: DC traction motor, thermal state of traction motor collector, heating processes of an electric machine.

References

1. Grishchenko A. V. & Strekopytov V. V. *Elektricheskie mashiny i preobrazovateli podvizhnogo sostava*. Uchebnyk dlia studentov srednego professional'nogo obrazovaniia [*Electric machines and converters of rolling stock*. Textbook for students of secondary vocational education]. Moscow, Akademiia Publ., 2005, 320 p. (In Russian)
2. Grishchenko A. V., Grachev V. V., Bazilevskii F. Yu. & Schreiber M. A. Eksperimental'nye issledovaniia teplovogo sostoiianiia kollektora TED [Experimental studies of the thermal state of an electric traction motor collector]. *Lokototivy. Elektricheskii transport. XXI vek. Sbornik materialov VI mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, posviashchennoi 90-letiiu so dnia rozhdeniia doktora tekhnicheskikh nauk, professora kafedry "Elektricheskaiia taiga" PGUPS A. V. Plaksa* [*Locomotives. Electric transport. Twenty-first century. Coll. papers of the 6th International scientific and technical conference dedicated to the 90th anniversary of Dr. Sci. in Engineering, Petersburg State Transport University's Electric Traction department professor A. V. Plaks*]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2018, pp. 124–129. (In Russian)
3. Kosmodamianskii A. S. *Avtomaticheskoe regulirovanie temperatury obmotok tiagovykh elektricheskikh mashin lokomotivov*. Monografiia [*Automatic temperature regulation of windings of locomotive electric traction machines*. Monograph]. Moscow, Marshrut Publ., 2005, 256 p. (In Russian)
4. Kruchek V. A. & Dvorkin P. V. Perspektivy ispol'zovaniia titanovykh splavov dlia teplonapriazhennykh detalei [Prospects of using titanium alloys for heat-stressed parts]. *Biulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniia* [*Bulletin of research results*], 2016, iss. 1, pp. 67–71. (In Russian)
5. Dvorkin P. V. Metodika postroeniia temperaturnykh polei detalei tsilindro-porshnevoi gruppy [Method of building temperature fields of parts of cylinder-piston group]. *Biulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniia* [*Bulletin of research results*], 2017, iss. 4, pp. 14–17. (In Russian)
6. Schreiber M. A. Modelirovanie teplovogo sostoiianiia tiagovykh elektrodvigatelei postoiannogo toka [Simulation of thermal state of DC traction motors]. *Biulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniia* [*Bulletin of research results*], 2014, iss. 4 (13), pp. 36–38. (In Russian)
7. Grishchenko A. V., Grachev V. V., Bazilevskii F. Yu. & Schreiber M. A. *Osnovy teorii sistem avtomaticheskogo regulirovaniia*. Uchebnoe posobie dlia studentov [*Basics of the theory of automatic control systems*. Textbook for students]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2017, pt 1, 172 p. (In Russian)
8. Bazilevskii F. Yu., Grachev V. V., Grishchenko A. V., Kurilkin D. N. & Schreiber M. A. *Mul'timediinyi uchebnyk "Elementy avtomaticheskikh sistem"* [*Elements of automatic systems*. Multimedia textbook]. Registration certificate of software RUS 2015610565 30.09.2014. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2014, 124 p. (In Russian)
9. Grishchenko A. V., Grachev V. V., Kruchek V. A. & Schreiber M. A. Povyshenie effektivnosti tekhnicheskogo obsluzivaniia lokomotivov [Increasing efficiency of locomotive maintenance]. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia* [*Proceedings of Petersburg Transport University*

dings of Petersburg Transport University]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2012, iss. 4 (33), pp. 93–97. (In Russian)

10. Grishchenko A. V., Grachev V. V., Kurilkin D. N. & Schreiber M. A. *Izmenenie sistemy tekhnicheskogo obsluzhivaniia lokomotivov* [Change in the system of locomotive maintenance]. *Nauka i obrazovanie trans-*

portu [*Science and education for transport*], 2017, no. 1, pp. 25–27. (In Russian)

Received: February 04, 2019

Accepted: February 13, 2019

Author's information:

Marina A. SCHREIBER – Cand. Sci. in Engineering, Associate Professor; goshapti4ka@yandex.ru

УДК 629.4.073

Влияние системы безопасности высокоскоростного электропоезда «Afrosiyob» на условия эксплуатации

А. Я. Якушев¹, Т. М. Назирхонов¹, Ж. О. Кувондииков¹, Д. О. Раджибаев²

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

² Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта, Республика Узбекистан, 100167, Ташкент, ул. Адылходжаева, 1

Для цитирования: Якушев А. Я., Назирхонов Т. М., Кувондииков Ж. О., Раджибаев Д. О. Влияние системы безопасности высокоскоростного электропоезда «Afrosiyob» на условия эксплуатации // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 3. – С. 478–488. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-478-488

Аннотация

Цель: Определение влияния системы безопасности в процессе движения на работу высокоскоростного электропоезда «Afrosiyob», являющегося аналогом испанского электропоезда «Talgo-250», анализ режимов движения и условий эксплуатации с учетом повышенных требований безопасности применительно к организации движения и эксплуатации высокоскоростного электропоезда на участке Ташкент–Самарканд железных дорог Узбекистана, оценка рисков и угроз безопасности с точки зрения серьезности их последствий и негативных воздействий, а также оценка их повторяемости или вероятности возникновения, приводящих к угрозе безопасности. **Методы:** Проанализирована система безопасности высокоскоростного электроподвижного состава и выполнена серия тяговых расчетов на участке Ташкент–Хаваст с введением ограничений на режимы движения, обусловленных защитными воздействиями системы безопасности. **Результаты:** Рассмотрены условия и параметры движения высокоскоростного подвижного состава с учетом требований к обеспечению безопасности при ограничениях времени хода. **Практическая значимость:** Приведенные материалы полезны специалистам железнодорожного транспорта, в частности работа которых сопряжена с организацией движения и эксплуатацией, а также с разработкой мероприятий по повышению эффективности использования высокоскоростного пассажирского электроподвижного состава на магистральных и пригородных участках железных дорог Узбекистана.

Ключевые слова: высокоскоростной электроподвижной состав, система безопасности, условия эксплуатации, повышенные требования безопасности, лимиты скорости электропоезда.

Введение

Высокоскоростной электропоезд «Afrosiyob», являясь аналогом испанского электропоезда «Talgo-250» (рис. 1), представляет собой состав постоянного формирования с электрической тягой, обеспечиваемой головным и концевым вагонами электропоезда. В состав электропоезда входят восемь пассажирских вагонов и вагон-ресторан.

Силовые моторные вагоны двухсистемные, т. е. эксплуатируемые на линиях с напряжением контактной сети 25,0 кВ (переменного тока) и 3,0 кВ (постоянного тока). В процессе работы на участках переменного тока мощность каждого моторного вагона составляет 2400 кВт, а на участках постоянного тока – 2000 кВт. Силовые моторные вагоны, массой 72 т каждый, оборудованы тяговыми преобразователями с IGBT-транзисторами рабочим на-



Рис. 1. Электropоезд «Afrosiyob»

пряжением 6,5 кВ и асинхронными тяговыми электродвигателями. В тяговых преобразователях применена типовая для двухсистемных электровозов «Bombardier» схема преобразования энергии.

С учетом того, что высокоскоростной электропоезд «Afrosiyob» разработан на базе электропоездов «Talgo-250», продолжительное время успешно эксплуатируемых на европейских железных дорогах, «Afrosiyob» оборудован системами, удовлетворяющими всем требованиям, предъявляемым к высокоскоростным электропоездам Европы [1]. Для обеспечения эксплуатации на железных дорогах Узбекистана и взаимодействия с существующими системами безопасности (АЛСН) электропоезд оснащен прибором безопасности КЛУБ-У.

Система безопасности поезда при возникновении неисправности способна без участия машиниста взять на себя функцию управления и произвести либо ограничение скорости движения, либо экстренно остановить поезд. Она называется Системой Администрации Контроля Поезда (TCMS) [2].

Структура TCMS является иерархической и подразделяется на три уровня контроля:

- контроль поезда;
- контроль одной единицы транспортного средства;
- контроль тяги.

TCMS осуществляет наблюдение и контроль следующих систем и элементов электропоезда:

- цепь высокого напряжения;
- силовая часть (трансформатор/конвертер/двигатель);
- режимы функционирования блоков системы управления;
- тележки (температура колес, редуктор, нестабильность);
- подвески (вибрации в механической части, давление в пневмоболонах);
- цепи безопасности;
- цепи управления дверями.

Информация о состоянии всех элементов и систем передается в систему диагностики, для того чтобы информировать машиниста о необходимых параметрах и их состоянии, а

также для анализа обслуживающим персоналом уровня безопасности [3].

В процессе программного управления транспортным средством термин «идентификация» используется для обозначения функции, которая в случае аварии подготавливает электропоезд к диагностическому обслуживанию. Для того чтобы ответственный по электропоезду специалист смог идентифицировать аварию или неполадку, загорается мигающая кнопка идентификации, которая расположена на консоли панели машиниста. При активации этой кнопки вызывается функция идентификации для всех неисправностей, которые существуют на момент контроля. Идентификация аварий может привести к выключению subsystemы.

При наличии неисправности желтый индикатор на мониторе указывает, в какой единице электропоезда возникла неисправность.

Все важные subsystemы в поезде при появлении неисправности или сбоя в работе подают сигнал через систему машинисту. На экране дисплея индикация неисправностей отображается посредством изменения цвета

на оранжевый того узла, в котором появляется неисправность (рис. 2). Пренебрежение или выключение оповещения, а также воздействие на систему в головном вагоне отображается соответствующим символом в пункте Обзор [4].

Система управления поезда подразделяется на так называемые «подсистемы». Такое подразделение помогает обеспечить не только неисправность, но и установить, какие узлы могут быть отключены от воздействия на систему управления.

Для манипуляций с системой, отключения или включения определенных узлов, деактивации воздействия неисправности на систему используется шкаф с панелью выключателей, называемый ВТСАВ (рис. 3).

Анализ и регистрация опасностей выполняются по принципу, указанному на рис. 4.

Угрозы безопасности классифицируются по нескольким уровням. К угрозам высокого уровня относятся:

- пожар;
- столкновение с другим подвижным составом;

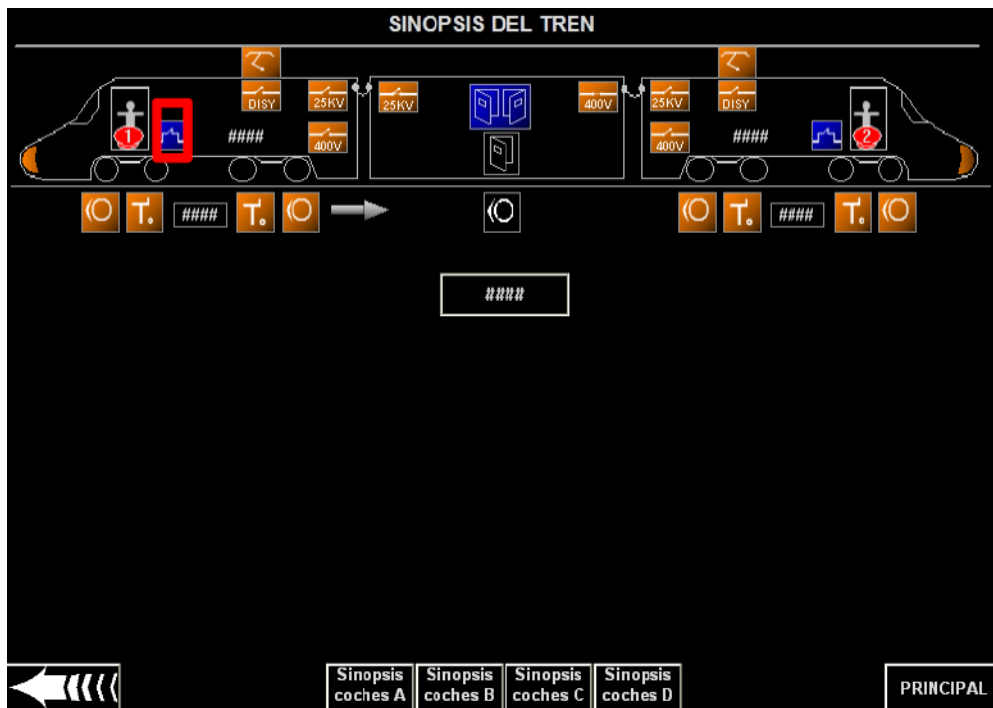


Рис. 2. Экран дисплея с оповещениями о неисправности

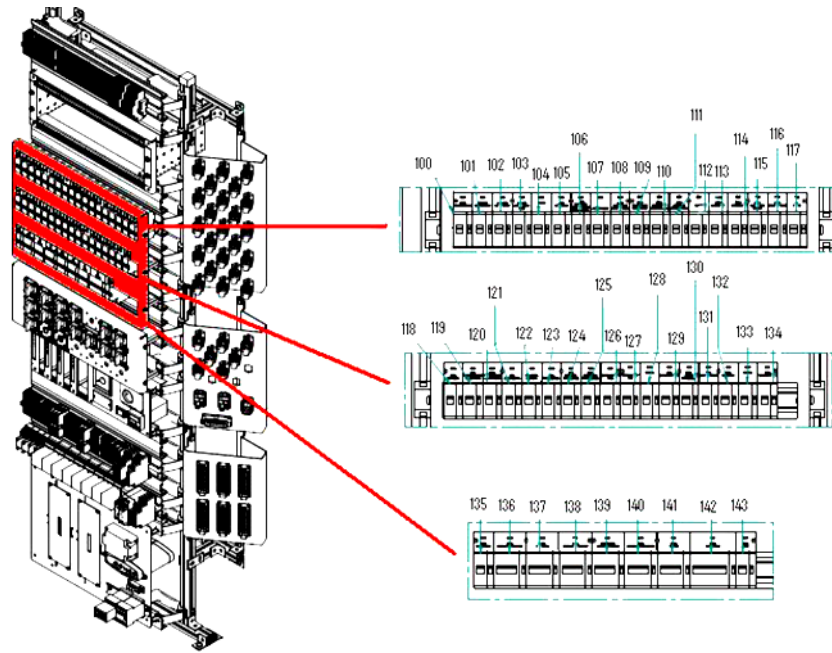


Рис. 3. Шкаф ВТСАВ



Рис. 4. Алгоритм анализа угрозы (а) и оценка рисков (б)

– сход с рельсов;
– ущерб для пассажиров, персонала или общества;

– загрязнение окружающей среды;
– серьезный материальный ущерб.

Оценка последствий в случае происшествий производится по табл. 1.

Оценка частоты последствий выполняется по принципам, систематизированным в табл. 2.

Фактор риска оценивается с учетом частоты повторяемости опасности с его последствиями. В соответствии с европейскими и международными стандартами риск подразделяется на несколько категорий. Компания Talgo

ТАБЛИЦА 1. Оценка последствий происшествий

Происшествие: вид последствия	Последствия для общества	Материальный ущерб	Загрязнение окружающей среды
Незначительные	Возможные незначительные травмы людей	До 10 тыс. евро	Незначительный ущерб одной системе
Второстепенные	Неизбежные незначительные травмы людей	От 10 до 100 тыс. евро	Серьезный ущерб одной или нескольким системам
Критичные	Гибель одного человека и/или серьезные травмы нескольких человек	От 100 тыс. евро до 1 млн евро	Потеря одной важной системы с повреждением сопутствующих или связанных систем
Катастрофические	Гибель двух и более человек и/или серьезные травмы нескольких человек	До 1 млн евро	Масштабное загрязнение на большой площади, с длительным воздействием последствий

ТАБЛИЦА 2. Уровни опасности

Категория уровня опасности	Описание частоты возникновения	Частота возникновения
Частые	Угроза опасности присутствует постоянно	10–100 раз в год
Возможные	Угроза опасности происходит с периодичностью до 1 раза в месяц	1–10 раз в год
Случайные	Ежегодно один раз	Один раз каждые 1–10 лет
Отдаленные	Может произойти в течение жизненного цикла	Один раз каждые 10–1000 лет
Маловероятные	Маловероятные, но возможные	Один раз каждые 1000–100 000 лет
Невероятные	Предполагается, что опасность не произойдет	Меньше, чем один раз в 100 000 лет

ТАБЛИЦА 3. Факторы риска

Частота одного происшествия	Незначительные	Второстепенные	Критичные	Катастрофические
Частые	Нежелательный риск	Не приемлемый риск	Не приемлемый риск	Не приемлемый риск
Возможные	Приемлемый риск	Нежелательный риск	Не приемлемый риск	Не приемлемый риск
Случайные	Приемлемый риск	Нежелательный риск	Нежелательный риск	Не приемлемый риск
Отдаленные	Незначительный риск	Приемлемый риск	Нежелательный риск	Нежелательный риск
Маловероятные	Незначительный риск	Незначительный риск	Приемлемый риск	Приемлемый риск
Невероятные	Незначительный риск	Незначительный риск	Незначительный риск	Незначительный риск

ТАБЛИЦА 4. Категория риска

Категория риска	Требуемые действия
Не приемлемый риск	Дальнейшие улучшения в конструкции или системе необходимы для устранения опасности полностью или для снижения риска до приемлемого уровня
Нежелательный риск	Дальнейшие улучшения необходимы для уменьшения рисков до приемлемого уровня
Приемлемый риск	При данном положении осуществляется постоянный контроль с предупредительными мерами (периодические проверки, анализ эксплуатации и технического состояния, предупреждение и обучение персонала)
Незначительный риск	Приемлем. Дальнейшие действия не требуются

использует категории, указанные в EN50126 (табл. 3) [2].

Для каждой угрозы безопасности риск должен быть сведен к наименьшему уровню. В связи с этим необходимо применять соответствующие действия по предотвращению данных угроз (табл. 4).

Если авария приводит к деградации подсистемы, то происходит снижение скорости за счет применения максимального тормозного усилия (ограничения скорости либо экстренного торможения до полной остановки).

С этого момента в случае ограничения скорости TCMS следит, чтобы предельная скорость не превышала ограничение до прекращения подачи сигнала о неисправности.

В зависимости от серьезности неисправностей ограничения устанавливаются в пределах от 5 до 235 км/ч. Ограничения, выявленные системой без участия машиниста, при возникновении неисправностей обозначены как лимиты (Lim) скорости. Приведем основные виды неисправностей, при которых действуют лимиты скорости [5–7]:

1) максимальная скорость электропоезда $V = 250$ км/ч;

2) Lim 235 км/ч – ограничение выявляется системой при отключении от питания воздухом тормозов на двух вагонах одновременно;

3) Lim 220 км/ч – ограничение устанавливается системой при выявлении вибрации и нестабильности механической части первого уровня в вагонах или локомотиве. Данное ограничение имеет место и при деактивации оповещения о неисправности дверей. Выявление повышенного давления в тормозных цилиндрах также приводит к данному лимиту скорости. Помимо вышеуказанных неисправностей такой лимит может быть вызван неисправностью датчиков контроля тележки (потеря сигнала);

4) Lim 200 км/ч – ограничение устанавливается системой при температуре в редукторах выше $t < 135$ °С. При дальнейшем повышении температуры по достижении $t < 145$ °С срабатывает экстренное торможение;

5) Lim 185 км/ч – ограничение устанавливается системой при выявлении вибрации и нестабильности механической части второго уровня в моторном вагоне;

6) Lim 180 км/ч – ограничение устанавливается системой при нижеперечисленных неисправностях:

- при выявлении превышения температуры в подшипниках буксы на локомотиве и в вагонах свыше 95 °С,

- включение переключателя 4S11, который находится в промежуточном вагоне,

- включение переключателя 47S72 в ВТСАВ, который деактивирует все ограничения, вызванные в поезде,

- включение переключателя 47S73 в ВТСАВ, в результате чего снимаются ограничения, вызванные неисправностью в моторной тележке локомотивов,

- при работе в режиме сцепки (с локомотивом либо вторым составом),

- при потере связи с кабелем WTB;

7) Lim 140 км/ч – ограничение устанавливается системой при механическом отключении трех осей вагонов от тормозной магистрали;

8) Lim 80 км/ч – ограничение при индивидуальном неотпускании тормозов, когда колодки продолжают тормозить, изнашивая тормозной диск более 15 мин;

9) Lim 40 км/ч – ограничение при возникновении проблем с уровнем воздушной подвески вагонов, а также системой при блокировке колес прицепного или моторного вагона;

10) Lim 9 км/ч – ограничение возникает при проблемах отключения стояночного тормоза;

11) Lim 5 км/ч – ограничение устанавливается при открытых створках автосцепки.

Ряд мер при выявлении неисправности подразумевает продолжение движения поезда. Это означает, что движение при появлении некоторых неисправностей возможно с ограниченной скоростью [8–10].

Автоматическое принятие мер защиты при обнаружении неисправностей системой управления поездом предусматривает большинство случаев, которые могут возникнуть, и имеет гибкую функциональность для контроля обслуживающим персоналом и обеспечения высокоэффективной эксплуатации состава [1].

Для анализа влияния ограничений на время поездки выбран участок Ташкент–Хаваст железных дорог в Узбекистане. Расчеты проводились с помощью программы КОРТЭС (рис. 5). Результаты тяговых расчетов приведены в табл. 6 [5].

Выполненной серией расчетов при движении с минимальным ограничением времени хода установлено, что такие ограничения практически не влияют на условия эксплуатации. При введенных второстепенных угрозах, ограничивающих скорость движения, время хода поезда увеличивается, поезд приходит в конечный пункт с опозданием на 6 мин. При введенных критических угрозах, ограничивающих скорость движения, время хода поезда существенно увеличивается, опоздание поезда составляет более 2 ч.

Авторы предполагают продолжить описание результатов расчета в программе КОРТЭС иллюстрацией заданных параметров моделирования и отчетами о поездках в части удель-



Рис. 5. Графики расчета режимов движения в программе КОРТЭС

ТАБЛИЦА 6. Влияние ограничений на режим движения электропоезда на участке Ташкент–Хаваст

Время хода электропоезда	Устанавливаемый лимит скорости	Влияние ограничений на время поездки
75,5 мин	Lim 235, Lim 220, Lim 200, Lim 185, Lim 180	Практически не влияют
81,4 мин	Lim 140	Влияют задержкой на 6 мин
Более 2 ч	Lim 80, Lim 40	Влияют существенно

ного расхода электроэнергии при различных движениях с учетом ограничения скоростей движения.

Заключение

С увеличением скоростей перевозок возрастает значимость обеспечения безопасности на электроподвижном составе. При выходе из строя определенных элементов обязательно должны приниматься меры для предотвращения негативных воздействий и устранения угрозы безопасности.

Решения компании «Talго» по обеспечению безопасности, внедренные с учетом требований безопасности для Европейского региона, обеспечивают высокий уровень безопасности при эксплуатации высокоскоростных поездов «Afrosiyob» на железных дорогах Узбекистана. Интегрирование в систему безопасности комплекса КЛУБ, необходимое для эксплуатации на железных дорогах Узбекистана, реализовано оптимально.

Полученные параметры скоростей движения с разными ограничениями могут быть полезны специалистам, работающим в сфере эксплуатации высокоскоростного пассажир-

ского подвижного состава в условиях Государственной акционерной железнодорожной компании «Ўзбекистон темир йуллари».

Библиографический список

1. Лувишис А. Л. Высокоскоростные поезда на железных дорогах стран-членов ОСЖД / А. Л. Лувишис // Бюл. ОСЖД. – Варшава, 2012. – № 4. – С. 17–27.

2. Испытания «Тальго» – нового поезда РЖД. – URL : <http://poezd.drezna.ru/info/2014/ispytania-poezda-talgo> (дата обращения : 02.04.2019).

3. Бердиев У. Т. Эксплуатация и ремонт электровазов «O'zbekiston» и «O'z-Y» / У. Т. Бердиев, И. С. Камалов, У. Ш. Исроилов, Д. О. Раджибаев. – Ташкент : MCHJ ADAD PLYUS, 2016. – 286 с.

4. Абляимов О. С. К исследованию процесса движения высокоскоростных поездов в кривых участках железных дорог / О. С. Абляимов // Изв. Транссиба. – 2014. – № 4 (20). – С. 2–9.

5. Абляимов О. С. К вопросу организации высокоскоростного движения пассажирских поездов на участке Ташкент–Самарканд / О. С. Абляимов, О. М. Курбанов // Актуальные вопросы высокоскоростного движения. – Ташкент : Ташкент. ин-т инженеров ж.-д. транспорта, 2013. – С. 10–13.

6. Овчинников А. Н. Скоростное и высокоскоростное движение на железных дорогах Узбекиста-

на / А. Н. Овчинников, А. Ф. Расулов, З. Т. Фозилов // Путь. – 2012. – № 5. – С. 65–67.

7. Пузанков А. Д. Методы расчета и использования показателей надежности в эксплуатации : учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта / А. Д. Пузанков. – М. : МИИТ, 2004. – 61 с.

8. Исаев И. П. Определение эксплуатационных коэффициентов электроподвижного состава с учетом последствий в процессе его функционирования / И. П. Исаев, А. В. Горский, В. А. Козырев // Труды МИИТ. – 1976. – Вып. 524. – С. 66–73.

9. Штраус П. Надежность и техническое обслуживание железнодорожного подвижного состава : отчет о НИР / П. Штраус. – Дрезден : Высшая школа техники и экономики, 2010. – 91 с.

10. Talgo 250 – максимальная универсальность в эксплуатации и высокая скорость. – URL : <https://www.talgo.com/ru/rolling-stock/high-speed/250-ru/> (дата обращения : 02.04.2019).

Дата поступления: 15.05.2019

Решение о публикации: 27.05.2019

Контактная информация:

ЯКУШЕВ Алексей Яковлевич – канд. техн. наук, доцент; el_tyaga@mail.ru

НАЗИРХОНОВ Тулаган Мансурхон угли – аспирант; tolagan@mail.ru

КУВОНДИКОВ Жалолоиддин Мангуберди Олимбой угли – аспирант; jaloliddin1690@gmail.com

РАДЖИБАЕВ Давран Оқтамбаевич – канд. техн. наук, ст. преподаватель; davronmail@bk.ru

The influence of the safety system of the "Afrosiyob" high-speed electric train on operating conditions

A. Ya. Yakushev¹, T. M. Nazirkhonov¹, Zh. O. Kuvondikov¹, D. O. Rajibaev²

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

² Tashkent Railway Engineering Institute, 1, Adylkhodzhaev ul., Tashkent, 100167, The Republic of Uzbekistan

For citation: Yakushev A. Ya., Nazirkhonov T. M., Kuvondikov Zh. O., Rajibaev D. O. The influence of the safety system of the "Afrosiyob" high-speed electric train on operating conditions. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 3, pp. 478–488.

DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-478-488 (In Russian)

Summary

Objective: To determine the impact of the security system during movement on the operation of the high-speed “Afrosiyob” electric train, which is an analogue of the Spanish Talgo-250 electric train. To analyze driving modes and operating conditions taking into account the increased safety requirements in relation to the organization of movement and operation of the high-speed electric train at the Tashkent–Samarkand section of the Uzbekistan railways. To assess the risks and threats to security in terms of the severity of their consequences and negative impacts, as well as their repetition or likelihood of causing a safety hazard. **Methods:** The safety system of the high-speed electric rolling stock was analyzed and a series of traction calculations were performed at the Tashkent–Havast section with the introduction of restrictions on traffic modes due to the protective effects of the security system. **Results:** The conditions and parameters of the high-speed rolling stock operation were considered taking into account the requirements for ensuring safety in case of travel time restrictions. **Practical importance:** The conducted study is useful for railway transport engineers, in particular the specialists whose work is connected with the organization of movement and operation, as well as the development of measures to improve the efficiency of using the high-speed passenger electric rolling stock at the main and suburban railway sections of Uzbekistan.

Keywords: High-speed electric rolling stock, safety system, operating conditions, increased safety requirements, electric train speed limits.

References

1. Luvishis A. L. Vysokoskorostniye poezda na zheleznykh dorogakh stran-chlenov OSZhD [High-speed trains on the railways of the OSJD member countries]. *Byulleten OSZhD [Bulletin of OSJD [Organization for Cooperation between Railways]]*. Warsaw, 2012, no. 4, pp. 17–27. (In Russian)
2. *Ispytaniya “Talgo” – novogo poezda RZhD [Tests of “Talgo” – the new train of Russian Railways]*. Available at: <http://poezd.drezna.ru/info/2014/ispytania-poezda-talgo/> (accessed: 02.04.2019). (In Russian)
3. Berdiev U. T., Kamalov I. S., Isroilov U. Sh. & Rajibaev D. O. *Ekspluatatsiya i remont elektrovozov “O’zbekiston” i “O’z-Y” [Operation and repair of “O’zbekiston” and “O’z-Y” electric locomotives]*. Tashkent, MCHJ ADAD PLYUS Publ., 2016, 286 p. (In Russian)
4. Ablyalimov O. S. K issledovaniyu protsessu dvizheniya vysokoskorostnykh poezdov v krivykh uchastkakh zheleznykh dorog [To the study of operation process of high-speed trains on curved sections of railways]. *Izvestiya Transsiba [Transsib Proceedings]*, 2014, no. 4 (20), pp. 2–9. (In Russian)
5. Ablyalimov O. S. & Kurbanov O. M. K voprosu organizatsii vysokoskorostnogo dvizheniya passazhirskikh poezdov na uchastke Tashkent–Samarkand [On the organization of high-speed traffic of passenger trains at the Tashkent–Samarkand section]. *Aktualniye voprosy vysokoskorostnogo dvizheniya [Topical issues of high-speed traffic]*. Tashkent, Tashkent. Institute of Railway Transport Engineers Publ., 2013, pp. 10–13. (In Russian)
6. Ovchinnikov A. N., Rasulov A. F. & Fozilov Z. T. Skorostnoye i vysokoskorostnoye dvizheniye na zheleznykh dorogakh Uzbekistana [High-speed traffic on the Uzbekistan railways]. *Put [Track]*, 2012, no. 5, pp. 65–67. (In Russian)
7. Puzankov A. D. *Metody rascheta i ispolzovaniya pokazateley nadezhnosti v ekspluatatsii [Methods of calculating and using indicators of reliability in operation]*. Manual for railway universities. Moscow, MIIT [Russian University of Transport] Publ., 2004, 61 p. (In Russian)
8. Isaev I. P., Gorsky A. V. & Kozyrev V. A. Opre-deleniye ekspluatatsionnykh koeffitsientov elektropodvizhnogo sostava s uchetom posledestviya v protsesse yego funktsionirovaniya [Determination of operational coefficients of the electric rolling stock, taking into account the aftereffect in the process of its functioning]. *Trudy MIIT [Proceedings MIIT]*, 1976, iss. 524, pp. 66–73. (In Russian)
9. Strauss P. *Nadezhnost i tekhnicheskoye obsluzhivaniye zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Otchet o NIR [Reliability and maintenance of the railway*

rolling stock. Research report]. Dresden, Higher School of Engineering and Economics Publ., 2010, 91 p. (In Russian)

10. *Talgo 250 – maksimalnaya universalnost v ekspluatatsii i vysokaya skorost [Talgo 250 – maximum versatility in operation and high speed]*. Available at: <https://www.talgo.com/ru/rolling-stock/high-speed/250-ru/> (accessed: 02.04.2019). (In Russian)

Received: May 15, 2019

Accepted: May 27, 2019

Author's information:

Aleksey Ya. YAKUSHEV – Cand. Sci. in Engineering, Associate Professor; el_tyaga@mail.ru

Tulagan M. ugli NAZIRKHONOV – Postgraduate Student; tolagan@mail.ru

Zhaloliidin Manguberdi O. ugli KUVONDIKOV – Postgraduate Student; jaloliddin1690@gmail.com

Davran O. RADZHIBAEV – Cand. Sci. in Engineering, Senior Lecturer; davronmail@bk.ru



УДК 691.5

К вопросу механоактивации цеолитсодержащих пород

А. И. Адылходжаев¹, И. А. Кадыров¹, К. С. Умаров², А. А. Назаров³

¹ Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта, Республика Узбекистан, 100167, Ташкент, ул. Адылходжаева, 1

² СП ООО «Vinokor temir-beton servis», Республика Узбекистан, 100022, ул. Кичик Халка Йули, 89А

³ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Адылходжаев А. И., Кадыров И. А., Умаров К. С., Назаров А. А. К вопросу механоактивации цеолитсодержащих пород // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 3. – С. 489–498.

DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-489-498

Аннотация

Цель: Изучение процессов механоактивации цеолитсодержащих пород. **Методы:** Использованы аналитические и экспериментальные методы исследований. **Результаты:** Оценена размываемость цеолитсодержащих пород на шаровой мельнице при разных режимах измельчения. Определены рациональные режимы работы мельницы в процессе помола требуемой степенью измельчения, дающие возможность значительно снизить энергозатраты размолочного процесса. **Практическая значимость:** С практической точки зрения, полученные данные позволяют уменьшить энергозатраты процесса помола цеолитсодержащих пород и увеличить значения коэффициента полезного действия оборудования и повышения качества готового продукта.

Ключевые слова: Цеолитсодержащая порода, механоактивация, шаровая мельница, агрегация, метод Козени–Кармана, удельная поверхность, средний диаметр частиц.

Введение

Одним из эффективных направлений энергосбережения в производстве цемента, получившем распространение во всем мире, является замена части цементного клинкера минеральными добавками в виде пуццолановых пород. В США средний объем вводимых таких добавок составляет около 40% от массы цемента, в КНР – 35%, что позволяет снизить удельные

затраты топлива в среднем на 30–40 кг усл. т на 1 т продукта. Приблизительно такое количество минеральных добавок применяют на цементных заводах Японии, Турции и в других странах [1–5].

Как известно, получение смешанных цементов – сложный процесс, осуществляемый двумя методами: путем совместного помола клинкера с твердой минеральной породой либо путем смешения цемента с предвари-

тельно размельченным отходом производства или горной породы. Как показывают многочисленные исследования, выполненные в разное время, вяжущие, полученные вторым способом, обладают рядом положительных свойств, применение которых дает возможность значительно повысить физико-технические характеристики бетонов и растворов на их основе [6–12].

К основным технологическим переделам при производстве цемента и переработке разнообразных сырьевых материалов в технический продукт относится процесс механоактивации, т. е. модификации твердых веществ при механической обработке (рис. 1).

Существует большое количество помольных агрегатов, среди которых широкое распространение получили барабанные шаровые мельницы, позволяющие осуществлять помол твердых материалов в различных режимах.

Измельчение приводит к накоплению структурных дефектов, увеличению кривизны поверхности, фазовым превращениям и даже к аморфизации кристаллов, что влияет на их химическую активность. Механоактивация – следствие создания в некоторой области твердого тела напряжений с последующей их релаксацией.

Важную роль в процессе измельчения твердых материалов до заданной степени дисперсности играет скоростной режим работы шаровой мельницы. От скорости вращения барабана мельницы зависит динамика загрузки барабана, которая обеспечивает разрушающее воздействие на измельчаемый материал. В шаровых мельницах реализуется измельчение тремя методами: истирающем, ударно-истирающем и ударным.

В статье приводятся результаты экспериментальных и теоретических исследований механоактивации цеолитсодержащих пород, а также данные по оптимизации параметров помола, анализа удельной поверхности и среднего диаметра частиц, полученных при разных режимах работы на барабанных шаровых мельницах.

Методы исследований и характеристика сырьевых материалов

Процесс помола цеолитсодержащих горных пород осуществляли в лабораторной шаровой мельнице ШЛМ-100 в трех режимах: истирающем, ударно-истирающем и ударном.

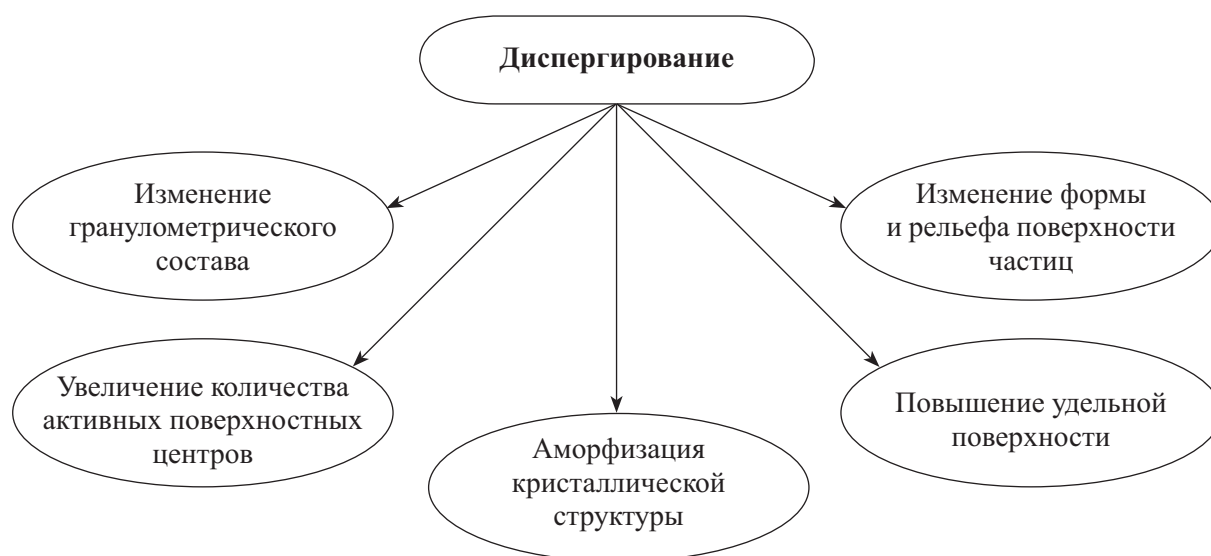


Рис. 1. Основные параметры, характеризующие реакционную способность материалов при механоактивации

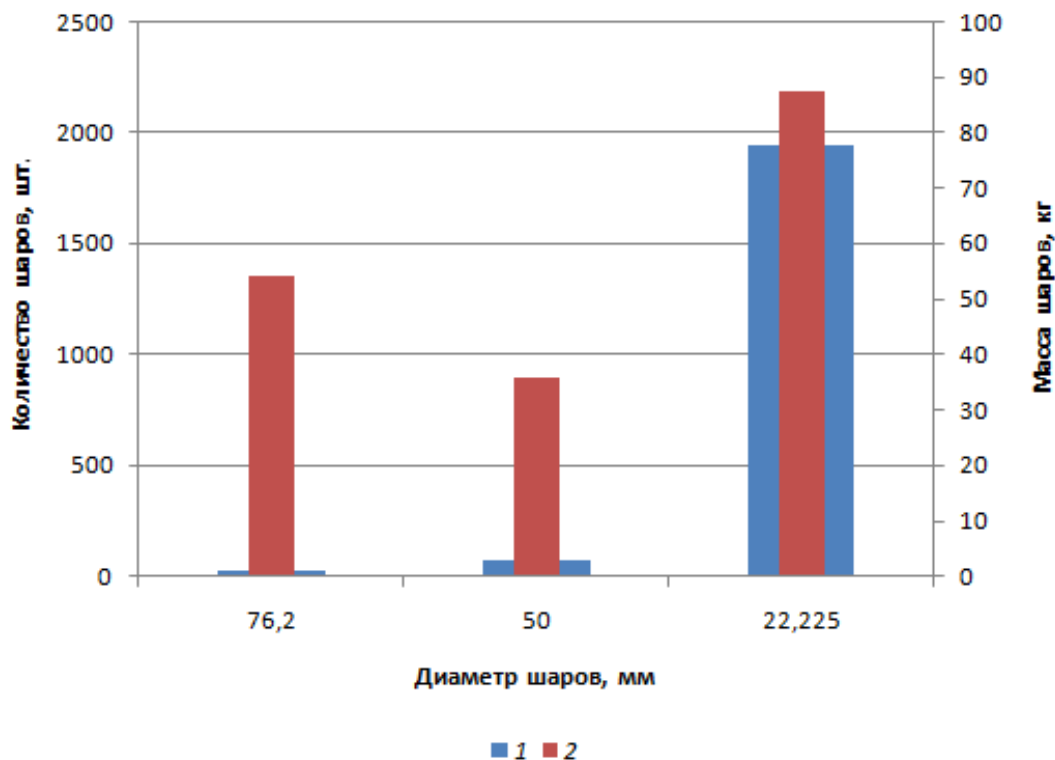


Рис. 2. Количество и диаметр шаров при загрузке в шаровую мельницу:
1 – количество шаров; 2 – масса шаров

Объем рабочей камеры мельницы – 100 л, шаровая загрузка составляет 40 л (рис. 2). Количество измельчаемого материала, засыпаемого в мельницу, – 12–25 % от общего объема камеры. При исследовании размалываемости цеолитсодержащих пород в барабаны загружалось 15 кг сырья. Материал измельчали до удельной поверхности 2000–11 000 см²/г с предварительным высушиванием исходного сырья до постоянной массы при температуре ±105 °С.

Тонкость помола оценивали по удельной поверхности на поверхностометре ПСХ-11А. Работа прибора основывается на методе газопроницаемости Козени–Кармана и заключается в определении времени прохождения фиксированного объема воздуха через слой образца, состоящего из непористых округлых частиц порошков [13]. ПСХ-11А предназначен для определения удельной поверхности, среднего размера частиц и газопроницаемости диспергированных твердых материалов.

Все измерения и расчеты автоматизированы, что исключает фактор субъективной ошибки. Удельную поверхность (S , см²/г) и среднemasовый размер частиц (d , мкм) исследуемых порошков прибор рассчитывает и визуализирует на дисплее. Для контроля агрегации использовали сито № 008.

Приведем химический состав цеолитсодержащей породы: SiO₂ – 44,96 %, TiO₂ – 0,73 %, Al₂O₃ – 22,88 %, Fe₂O₃ – 4,41 %, FeO – 0,13 %, CaO – 1,24 %, Na₂O – 9,17 %, K₂O – 1,30 %, п.п.п. – 14,72 %.

Результаты и их обсуждение

Процесс измельчения оценивали степенью измельчения i – отношением среднего размера куска перед измельчением R к среднему размеру после измельчения r [14]:

$$i = R / r.$$

При решении вопросов эффективности измельчения различных по происхождению горных пород необходимо применять комплексный подход, охватывающий целый комплекс задач. В частности, при выборе дробильно-помольных машин следует учитывать эксплуатационные расходы, удельный расход энергии, степень измельчения. Размалываемые материалы должны иметь наименьшие сопротивления, возникающие в машинах усилиями в виде удара, истирания или их комбинации. Нужно также принимать в расчет плотность, вязкость, твердость породы, форму кусков, влажность и т. д.

С целью изучения вышеуказанных параметров для оценки размалываемости цеолитсодержащих пород была проведена оценка различных режимов (истирающем, ударно-истирающем, ударном) измельчения для получения необходимого спектра данных.

Продолжительность размола вычисляли по формуле

$$t = A/n,$$

в которой t – продолжительность помола, мин; A – число оборотов вращения барабана; n – скорость вращения барабана мельницы, об/мин.

Производительность мельницы рассчитывали следующим образом:

$$B = (P \cdot 60) / t,$$

где B – производительность мельницы, кг/ч; P – масса материала, загруженного в мельницу, кг; t – продолжительность размола, мин.

Полученные результаты исследований размалываемости цеолитсодержащих пород при разных режимах измельчения представлены на рис. 3–5.

Как известно, процесс помола характеризуется наличием трех этапов. На I этапе происходит раскрытие крупных и мелких пор, разделение породы на отдельные элементы. Удельная поверхность увеличивается пропорционально расходу электроэнергии [15].

На II этапе при дальнейшем дроблении количество дефектов структуры уменьшается, сопротивление размолу возрастает и для измельчения отдельных кристаллов требуется значительно больше затрат энергии. На данном этапе работа разрыва связей зависит от микроструктуры и фазового состава материала. Рост удельной поверхности замедляется, однако прямолинейная зависимость расхода электроэнергии от прироста удельной поверхности сохраняется [15].

На III этапе в процессе дальнейшего измельчения наблюдаются явления налипания и агрегирования [15].

При изучении агрегации материала с использованием сита № 008 установлено, что уменьшение количества остатка на сите происходит при достижении значения удельной поверхности 4520 см²/г. При дальнейшей диспергации величина остатка на сите № 008 начинает расти. Чем дисперснее материал, тем выше его склонность к агрегации.

С уменьшением размера каждой частицы общая поверхность измельченного вещества быстро растет, тогда как объем частицы при сложении обломков остается постоянным. Быстро увеличивающаяся с измельчением поверхность обладает запасом поверхностной энергии, которая в дальнейшем расходуется при формировании изделий из смеси с протеканием реакций по поверхностям раздела. При достижении некоторого предела дисперсности потенциальная энергия поверхности может возрасти, что нередко приводит к самопроизвольному агрегированию частиц с уменьшением удельной поверхности и увеличением неоднородности исходного продукта.

Производительность барабанных мельниц определяли опытным путем (рис. 6). Она зависит от размеров барабана, частоты вращения, коэффициента наполнения, массы дробящей нагрузки, физико-механических свойств измельчаемого материала и требуемой тонкости помола.

Из рис. 6 видно, что с увеличением удельной поверхности снижается производительность шаровой мельницы в обратном про-

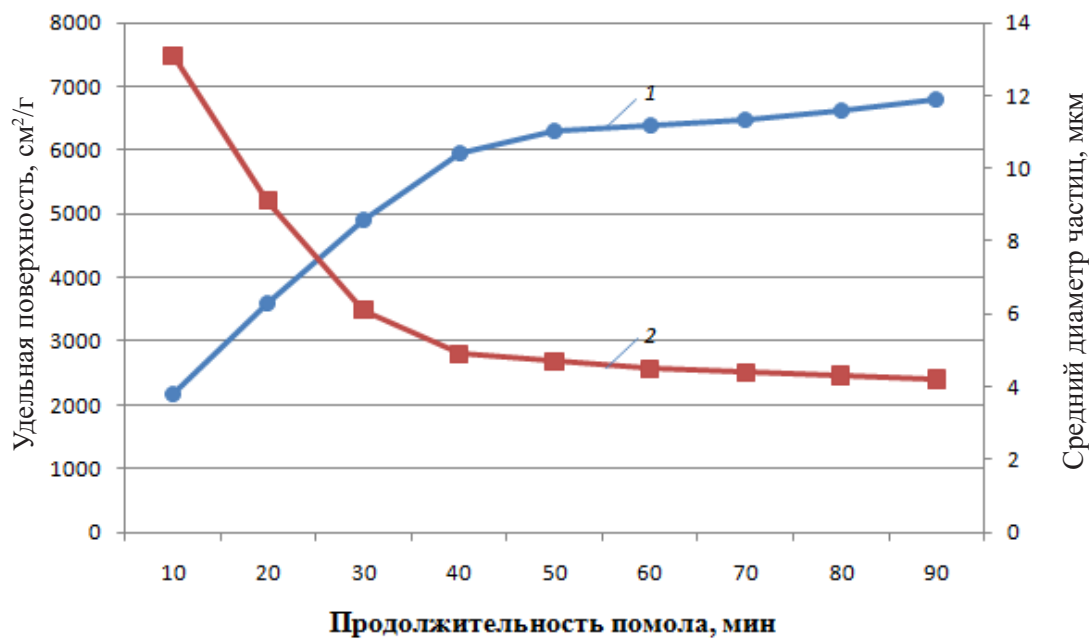


Рис. 3. Влияние продолжительности помола на величину удельной поверхности (1) и среднего диаметра частиц (2) при истирающем режиме работы мельницы

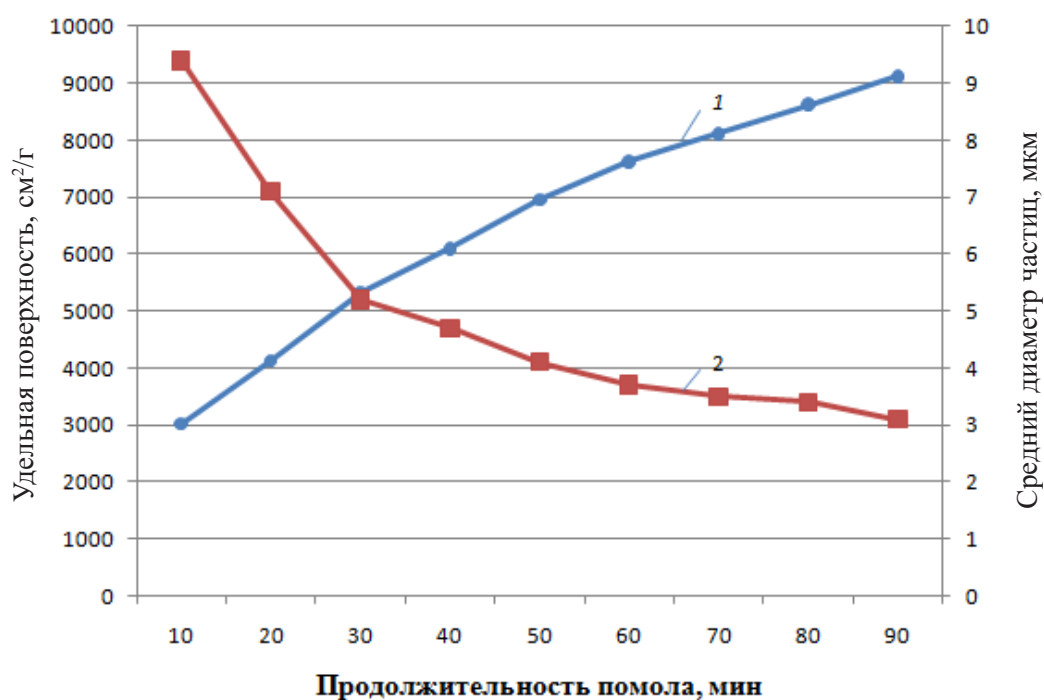


Рис. 4. Влияние продолжительности помола на изменение удельной поверхности (1) и среднего диаметра частиц (2) при ударно-истирающем режиме работы мельницы

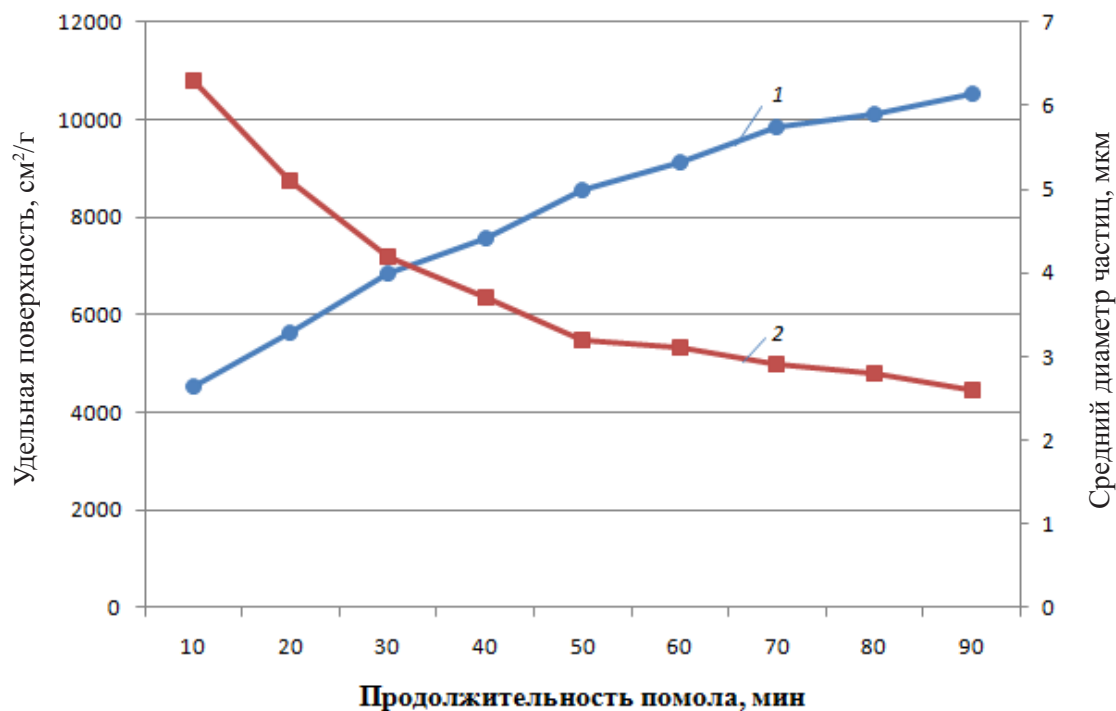


Рис. 5. Влияние продолжительности помола на величину удельной поверхности (1) и среднего диаметра частиц (2) при ударном режиме работы мельницы

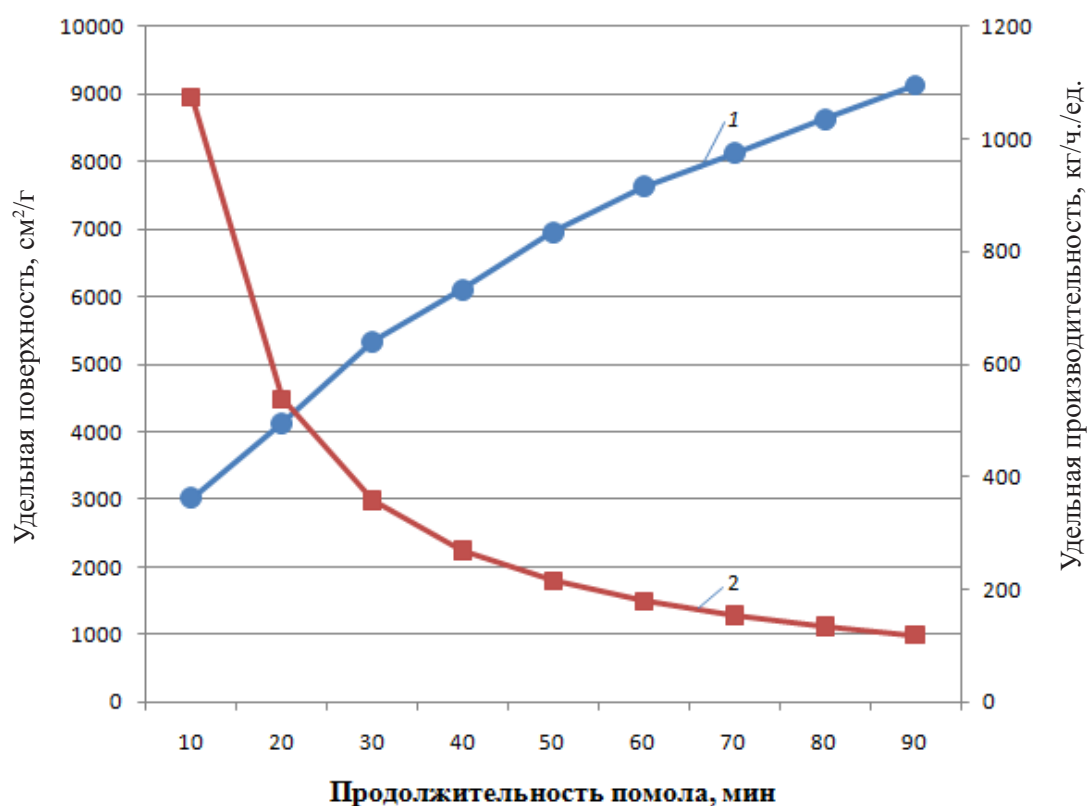


Рис. 6. Влияние продолжительности помола на величину удельной поверхности (1) и производительность шаровой мельницы (2) при ударном режиме работы мельницы

порционном порядке из-за того, что при частых соударениях энергия расходуется на частичное накопление кинетической энергии, запаса которой недостаточно для дальнейшего дробления и получения порошков с высокой дисперсностью [16], что необходимо учитывать при корректировании режимов воздействия на твердые материалы различного происхождения.

Заключение

В ходе сравнения величин тонкости помола измельчаемого природного цеолита установлено, что истирающий режим шаровой мельницы способен измельчить за 90 мин до удельной поверхности $6800 \text{ см}^2/\text{г}$ и среднего диаметра частиц до $4,2 \text{ мкм}$.

Помол в ударно-истирающем режиме позволяет создать дисперсность $9130 \text{ см}^2/\text{г}$ при среднем диаметре частиц $3,1 \text{ мкм}$ за 90 мин.

При ударном режиме измельчения за 90 мин достигается удельная поверхность $10542 \text{ см}^2/\text{г}$. Средний диаметр частиц составляет $2,6 \text{ мкм}$.

Обнаружено, что после достижения удельной поверхности $4520 \text{ см}^2/\text{г}$, дальнейшая диспергация увеличивает количество остатка на сите № 008. Таким образом, можно утверждать, что дальнейший процесс диспергации приводит к агрегации частиц материала.

Цеолитсодержащая порода имеет полиминеральный состав и в основном состоит из минералов, предел прочности контактной зоны значительно ниже, чем цементного клинкера, известняка, опоки, трасса, кварца и т. д. Это дает основания утверждать, что значительно уменьшаются энергетические затраты и возрастает производительность барабанных шаровых мельниц при получении композиционных цементов.

Определение рационального режима работы мельницы в процессе помола с требуемой степенью измельчения позволяет значительно снизить энергозатраты процесса производства путем увеличения коэффициента полезного действия оборудования и повышения каче-

ства готового продукта. Приведенные результаты показали, что истирающий и ударно-истирающий режимы измельчения являются эффективными. Установлено, что при измельчении в ударном режиме за 10 мин наблюдается агрегирование частиц, которое влияет на качество конечного продукта.

Библиографический список

1. Кинчиков В. Энергосбережение в строительстве и ЖКХ / В. Кинчиков // Строительство и недвижимость. – 2000. – № 20. – С. 10–14.
2. Колдаев А. А. Цеолитсодержащие породы Западного Узбекистана и проблема их использования / А. А. Колдаев. – Ташкент : Фан, 1989. – 120 с.
3. Адылходжаев А. И. О свойствах многокомпонентных высококачественных бетонов с модифицированным зольным наполнителем / А. И. Адылходжаев, И. М. Махаматалиев, В. М. Цой // Вестн. ТашИИТ. – 2017. – № 2–3. – С. 3–7.
4. Адылходжаев А. И. Вопросы управления качеством при проектировании составов многокомпонентных высококачественных бетонов с минеральными наполнителями / А. И. Адылходжаев, И. М. Махаматалиев, В. М. Цой // Вестн. ТГТУ. – 2016. – № 1. – С. 252–260.
5. Адылходжаев А. И. О структурно-имитационном моделировании прочности цементного бетона / А. И. Адылходжаев, И. М. Махаматалиев, В. М. Цой // Материалы Междунар. науч.-технич. конференции «Прочность конструкций, сейсмодинамика зданий и сооружений». – Ташкент, 2016. – С. 64–68.
6. Адылходжаев А. И. Методологические основы исследования многокомпонентных высококачественных бетонов нового поколения : монография / А. И. Адылходжаев, И. М. Махаматалиев, В. М. Цой. – Ташкент : Fan va Texnologiya, 2018. – 156 с.
7. Ходаков Г. С. Тонкое измельчение строительных материалов / Г. С. Ходаков. – М. : Стройиздат, 1972. – 237 с.
8. Титова Т. С. Использование в строительстве автоклавного шумозащитного пенобетона / Т. С. Ти-

това, Е. И. Макарова, Е. П. Дудкин // Технологии техносферной безопасности. – 2014. – № 2. – С. 35.

9. Аввакумов Е. Г. Механические методы активации химических процессов / Е. Г. Аввакумов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Новосибирск : Наука, 1986. – 303 с.

10. Дешко Ю. И. Измельчение материалов в цементной промышленности / Ю. И. Дешко, М. Б. Креймер, Г. С. Крыхтин. – 2-е изд. – М. : Стройиздат, 1966. – 270 с.

11. Адилходжаев А. И. Теоретические аспекты структурно-имитационного моделирования макроструктуры композиционных строительных материалов / А. И. Адилходжаев, И. М. Махаматалиев, С. С. Шаумаров // Науч.-технич. вестн. Брянск. гос. ун-та. – Брянск : БГУ, 2018. – № 3. – С. 312–320.

12. Николаенко Е. А. Влияние механоактивации неорганических вяжущих веществ на качественное изменение прочностных характеристик бетонных изделий / Е. А. Николаенко // Изв. вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2011. – № 1 (1). – С. 107–117.

13. Патент № 2212028 РФ. Способ определения тонкости помола цемента / Г. М. Мартиросов, А. Д. Лазарев ; Гос. унитарн. предприятие «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и

технологический ин-т бетона и железобетона». – Заявл. 12.02.2002 г. – Опубл. 10.09.2003 г.

14. Мухамедбаев Аг. А. Особенности процесса помола электротермофосфорного шлака и его смесей / Аг. А. Мухамедбаев, Х. Х. Камилов, М. К. Хасанова, А. А. Тулаганов // Химия и химическая технология. – Ташкент : ТХТИ, 2016. – № 1. – С. 58–61.

15. Пашенко А. А. Вяжущие материалы / А. А. Пашенко, В. П. Сербин, Е. А. Сташевская. – Киев : Вища школа, 1975. – 444 с.

16. Булатов А. И. Правда о тампонажных цементах : в 2 т. / А. И. Булатов. – Краснодар : Просвещение-Юг, 2010. – Т. 1. – 1011 с.

Дата поступления: 18.03.2019

Решение о публикации: 29.03.2019

Контактная информация:

АДЫЛХОДЖАЕВ Анвар Ишанович – д-р техн. наук, профессор; anvar_1950@mail.ru

УМАРОВ Кадыр Сапарбаевич – канд. техн. наук; i.k.kadirov@yandex.ru

КАДЫРОВ Ильхом Абдуллаевич – докторант; ilhom.kadirov.1990@mail.ru

НАЗАРОВ Абдусаттор Абдурахманович – магистр; sattor_cool@mail.ru

On mechanical activation of zeolite-containing rocks

A. I. Adylkhodjayev¹, I. A. Kadyrov¹, K. S. Umarov², A. A. Nazarov³

¹ Tashkent Railway Engineering Institute, 1, Adylkhodzhaev ul., Tashkent, 100167, The Republic of Uzbekistan

² JV ООО “Binokor temir-beton servis”, 89A, Kilchik Khalka yuli ul., Tashkent, 100022, The Republic of Uzbekistan

³ Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Adylkhodjayev A. I., Kadyrov I. A., Umarov K. S., Nazarov A. A. On mechanical activation of zeolite-containing rocks. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 3, pp. 489–498. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-489-498 (In Russian)

Summary

Objective: The research was devoted to the processes of mechanical activation of zeolite-containing rocks. **Methods:** Analytical and experimental research methods were applied. **Results:** The results of studies on the grindability of zeolite-containing rocks in ball mills under different grinding conditions

were presented in the article. Rational modes of operation of the mill during the grinding process with the required degree of grinding were determined, making it possible to significantly reduce the energy consumption of the grinding process. **Practical importance:** From a practical point of view, the data obtained can reduce the energy consumption of the grinding process of zeolite-containing rocks and increase the values of equipment efficiency as well as to improve the quality of the final product.

Keywords: Zeolite-containing rock, mechanical activation, ball mill, aggregation, Kozeni–Karman method, specific surface, average particle diameter

References

1. Kinchikov V. Energoberezheniye v stroitelstve i ZhKKh [Energy saving in construction and housing and public utilities]. *Stroitelstvo i nedvizhimost [Construction and Estate Property]*, 2000, no. 20, pp. 10–14. (In Russian)
2. Koldaev A. A. *Tseolitsoderzhashchiye porody Zapadnogo Uzbekistana i problema ikh ispolzovaniya [Zeolite-containing rocks of Western Uzbekistan: application problem]*. Tashkent, Fan Publ., 1989, 120 p. (In Russian)
3. Adylkhodzhaev A. I., Makhamataliev I. M. & Tsoy V. M. O svoistvakh mnogokomponentnykh vysokokachestvennykh betonov s modifitsirovannym zolnym napolnitelem [On the properties of multicomponent high-quality concretes with modified ash filler]. *Vestnik TashIIT [Proceedings of Tashkent Institute of Railway engineers]*, 2017, no. 2–3, pp. 3–7. (In Russian)
4. Adylkhodzhaev A. I., Makhamataliev I. M. & Tsoy V. M. Voprosy upravleniya kachestvom pry proektirovaniy sostavov mnogokomponentnykh vysokokachestvennykh betonov s mineralnymi napolnityamy [The issues of quality management in the design of compositions of multicomponent high-quality concretes with mineral fillers]. *Vestnik TGTU [Proceedings of Tambov State Technical University]*, 2016, no. 1, pp. 252–260. (In Russian)
5. Adylkhodzhaev A. I., Makhamataliev I. M. & Tsoy V. M. O strukturno-imitatsionnom modelirovaniy prochnosty tsementnogo betona [On structural-simulation modeling of cement concrete strength]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Prochnost konstruksiy seismodinamika zdaniy i sooruzheniy” [Materials of the International Research and Training Conference “Strength of structures seismic dynamics of buildings and structures”]*. Tashkent, 2016, pp. 64–68. (In Russian)
6. Adylkhodzhaev A. I., Makhamataliev I. M. & Tsoy V. M. *Metodologicheskiye osnovy issledovaniya mnogokomponentnykh vysokokachestvennykh betonov novogo pokoleniya. Monographia [Methodological basis for the study of multicomponent high-quality concrete of a new generation. Monograph]*. Tashkent, Fan va Texnologiya Publ., 2018, 156 p. (In Russian)
7. Khodakov G. S. *Tonkoye izmelcheniye stroitelnykh materialov [Fine grinding of building materials]*. Moscow, Stroiizdat Publ., 1972, 237 p. (In Russian)
8. Titova T. S., Makarova E. I. & Dudkin E. P. Ispolzovaniye v stroitelstve avtoklavnogo shumozachshitnogo penobetona [The use of autoclaved noise-protective foam concrete in the construction]. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti [Technology of technosphere safety]*, 2014, no. 2, p. 35. (In Russian)
9. Avvakumov E. G. *Mekhanicheskiye metody aktivatsii khimicheskikh protsessov [Mechanical methods of activation of chemical processes]*. 2nd ed., revised and enlarged. Novosibirsk, Nauka Publ., 1986, 303 p. (In Russian)
10. Deshko Yu. I., Kreimer M. B. & Krykhtin G. S. *Izmelcheniye materialov v tsementnoy promyshlennosti [Grinding in the cement industry]*. 2nd ed. Moscow, Stroiizdat Publ., 1966, 270 p. (In Russian)
11. Adilkhodzhaev A. I., Makhamataliev I. M. & Shumarov S. S. Teoreticheskiye aspekty strukturno-imitatsionnogo modelirovaniya makrostrukturnykh kompozitsionnykh stroitelnykh materialov [Theoretical aspects of structural-simulation modeling of the macrostructure of composite building materials]. *Nauchno-tekhnicheskyy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta [Research and Technical Bulletin of Bryansk State University]*. Bryansk, BGU [Bryansk State University] Publ., 2018, no. 3, pp. 312–320. (In Russian)

12. Nikolaenko E.A. Vliyaniye mekhanoaktivatsii neorganicheskikh vyazhushchikh veshchestv na kachestvennoye izmneniye prochnostnykh kharakteristik betonnykh izdeliy [The effect of mechanical activation of inorganic binders on the qualitative change in the strength characteristics of concrete products]. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost* [News of Higher Educational Institutions. Investments. Building. Estate property], 2011, no. 1 (1), pp. 107–117. (In Russian)

13. Martirosov G.M. & Lazarev A.D. *Sposob opredeleniya tonkosty pomola tsementa* [The method for determining the fineness of cement grinding]. Patent RF, no. 2212028, 2003. Gosudarstvennoye unitarnoye predpriyatiye “Nauchno-issledovatel'skiy, proektno-konstruktorskiy i tekhnologicheskiy institute betona i zhelezobetona” [State Unitary Enterprise “Scientific Research, Design and Engineering Technological Institute of Concrete and Reinforced Concrete”]. Appl. 12.02.2002. Publ. 10.09.2003. (In Russian)

14. Mukhamedbaev Ag.A., Kamilov Kh. Kh., Khasanova M.K. & Tulaganov A.A. Osobennosti protsessy pomola elektrotermofosfornogo shlaka i ego smesey [Characteristic properties of the grinding process of electrothermophosphoric slag and its mixtures]. *Khi-*

miya i khimicheskaya tekhnologiya [Chemistry and Chemical Technology]. Tashkent, TKhTI [Tashkent Chemical Technological Institute] Publ., 2016, no. 1, pp. 58–61. (In Russian)

15. Pashchenko A.A., Serbin V.P. & Starchevskaya E.A. *Vyazhushchiye materialy* [Binding materials]. Kiev, Publishing House Association “Vishcha School”, 1975, 444 p. (In Russian)

16. Bulatov A.I. *Pravda o tamponazhnykh tsementakh. V 2 t.* [Oil-well cements: the facts. In 2 vol.]. Krasnodar, Prosveshcheniye-Yug [Enlightenment-South] Publ., 2010, vol. 1, 1011 p. (In Russian)

Received: March 18, 2019

Accepted: March 29, 2019

Author's information:

Anvar I. ADILKHODJAYEV – D. Sci. in Engineering, Professor; anvar_1950@mail.ru

Kadir S. UMAROV – Cand. Sci. in Engineering; i.k.kadirov@yandex.ru

Ilkhom A. KADIROV – Postdoctoral Student; ilhom.kadirov.1990@mail.ru

Abdusattor A. NAZAROV – Master; sattor_cool@mail.ru

УДК 625.12.033.38

Определение величин энергетических констант материалов при дроблении твердых тел

З. В. Кахаров¹, Ф. Ф. Эшонов¹, И. С. Козлов²

¹ Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта, Республика Узбекистан, 100167, Ташкент, ул. Адылхаджаева, 1

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

Для цитирования: Кахаров З. В., Эшонов Ф. Ф., Козлов И. С. Определение энергетических констант материалов при дроблении твердых тел // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 3. – С. 499–504.

DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-499-504

Аннотация

Цель: Рассмотреть вопрос оптимизации технических показателей при определении энергетических констант материалов и их критических масс в процессе дробления твердых тел. **Методы:** Проводился энергетический анализ строительных процессов при дроблении минеральных материалов дробилками различных конструкций, шаровыми и другими мельницами до получения сыпучих материалов (щебень различной крупности, клинец, песок и т. п.). **Результаты:** Определены энергетические константы материалов и их критических масс, имеющие решающее значение для оценки свойств материалов и установления их сопротивления разрушению в разных процессах взаимодействия с внешними воздействиями. Приведены результаты процессов дробления камня дробилками и образцов бетона прессом. **Практическая значимость:** Выяснено значение энергетической константы бетона, характеризующее его наиболее полно, при учете всех его физических свойств, влияющих на сопротивление внешним воздействиям. Разработанные методики могут быть рекомендованы к практическому использованию.

Ключевые слова: Щебень, клинец, дробление твердых тел, разрушение твердого тела, разрушающие напряжения, объемная и относительная деформации.

Дробление минеральных материалов производится дробилками разнообразных конструкций, дающими щебень разной крупности. Каменная «мелочь» – расщебенка, клинец – измельчается шаровыми и другими мельницами до получения «каменной муки». Аналогично перемалываются цементный «клинкер» и другие твердые материалы, переходящие в сыпучее состояние.

Естественное разрушение твердых тел в природе приводит к образованию песка из кварца, пылеватых грунтов и др., что связано с потерей твердыми телами энергии связей между материальными частицами. При искус-

ственном дроблении тел это вызвано затратой энергии, разрушающей внутренние связи.

Энергия сопротивления связей у твердых тел, в частности у разных пород камня, весьма неодинакова. Она определяется при сжатии образцов прессами, причем измеряются разрушающее напряжение на поверхности образцов R (Н/м²) и деформация сжатия δ (мм), произведение которых $R \cdot \delta$ характеризует работу, затраченную на разрушение образца.

При коэффициенте полезного действия процесса разрушения твердого тела энергия сопротивления (ϵ_0 , Дж), отнесенная к единице массы тела, равна

$$\varepsilon_0 = \frac{kR\omega\delta}{m},$$

здесь ω – площадь «контакта» разрушаемого тела (m^2) с прибором, производящим разрушение; m – масса перерабатываемого материала (количественный показатель), кг; k – коэффициент полезного действия (КПД).

Деформация сжатия δ колеблется в весьма больших пределах для разных тел и зависит от их сжимаемости. Разрушающее напряжение на поверхности контакта изменяется в еще большей степени. Однако по его величине невозможно достаточно судить о «прочности» тел, как это еще делается на производстве.

Напряжение R падает с поверхности вглубь (h , м) по следующему закону:

$$R_h = R_0 e^{-ah}. \quad (1)$$

В (1) h – глубина проникновения энергии в массу от поверхности контакта, a – амплитуда колебаний.

Также уменьшается и центральная деформация δ , стремясь к «нулю».

На глубине h от поверхности контакта площадь, воспринимающая вертикальное к ней давление, составляет $\omega_h = e^{ah}$.

Под поверхностью контакта образуется сжатое «ядро» вещества в виде конуса с образующей тела вращения $y = y_0 + e^{ah}$.

Напряжения на поверхностях тел, легко измеряемые приборами, не учитывают плотности веществ γ ($кг/см^3$) и деформируемости тел под действием поверхностных напряжений.

При объемной деформируемости iq_0 , где i – относительная деформация, а q_0 – объем тела, при напряжении R_0 энергия напряженного тела (Дж) рассчитывается по формуле

$$e_0 m_0 = iq_0 R_0,$$

а энергетический уровень тела (Дж/кг) – так:

$$\varepsilon_0 = \frac{iq_0}{m_0} \cdot R_0.$$

При сжатии ε_0 (Н/м²)

$$\varepsilon_0 = A \ln m_0.$$

и расширении

$$\varepsilon_0 = \frac{A}{l_n m_0} \pm R_0 = \frac{l}{1} A \ln m_0^{\pm 1}.$$

В теории дробления существуют гипотезы об энергии дробления. По теории Кика эта энергия пропорциональна кубам – объемам раздробленных частиц q при числе дробления $\frac{q_0}{q}$, а по теории Реттингера – пропорциональна поверхности раздробленных частиц (Дж/кг)

$$\varepsilon_0 = a \left(\frac{m_0}{m} \ln m - \ln m_0 \right). \quad (2)$$

Выражение (2) показывает, что теория Кика типична для крупного дробления, когда число дробления мало, а теория Реттингера – для мелкого дробления, когда оно несравненно возрастает.

При дроблении, происходящем при осевом сжатии тел, энергия ε_0 равна

$$\varepsilon_0 = \frac{A \ln m_0}{m_0},$$

что увязывается с выражением (2) при константе материала

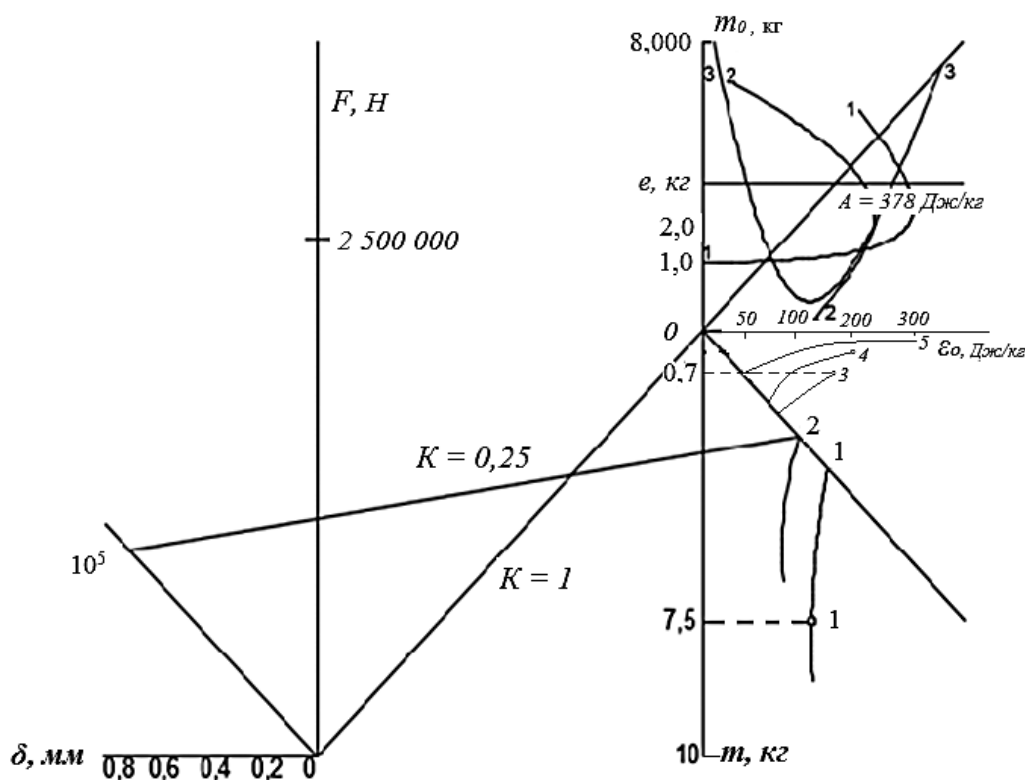
$$A = a \frac{m^2 \ln m}{m} a m_0, \quad \varepsilon_0 = \frac{a \ln m_0}{m_0}$$

и максимальна при $m_0 = e = 2,7182$, когда $e_0 = \frac{A}{e}$ достигает критического уровня при поглощении энергии массой.

Поглощаемая массой энергия осевого сжатия тела преодолевает энергию сопротивления до достижения нижнего критического уровня, когда связи между микрочастицами начинают разрушаться, энергия связей освобождаться и

Значения энергетической константы

Масса, m , кг	Энергетический уровень, E , Дж/кг	Энергетическая константа, A , Н·м/кг	Разрушающее усилие, F , Н	Деформация сжатия, δ , мм	Поглощенная энергия, E , кДж
7,5	63	236,2	450	1,1	495
2,7	14	378	—	—	—
2,1	118	334	250	1,1	250
0,75	164	—	110	1,2	132



Номограмма $e_0 m_0 = k N_0 t_0$ (Н·м) дробления твердого тела:
1, 2, 3 – кривые результатов дробления камня и образцов бетона

излучаться из массы, находившейся в устойчивом состоянии при $e_0 = A$ (Дж/кг). Энергетический уровень раздробленного тела падает при этом на

$$A - \frac{A}{e} = 0,64 A,$$

а масса (кг) достигает критического значения $m_0 = e$.

Определение энергетических констант материалов и их критических масс имеет решаю-

щее значение для оценки свойств материалов и установления их сопротивления разрушению в различных процессах взаимодействия с внешними воздействиями.

Опытные данные (таблица) позволяют определить энергетическую константу бетона по образцам разной массы при показателе степени e^n , $n = 1$.

На номограмме (рисунок) приведены результаты дробления камня дробилками и образцов бетона прессом. Зависимость энерге-

тического уровня твердых тел от их массы $m = e^n$ устанавливается при $n = 1$. Таким образом, энергетическая константа бетона $A_0 = 378 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{кг}$ характеризует его наиболее полно, учитывая все его физические свойства, влияющие на сопротивление внешним воздействиям.

При установленном значении энергетической константы материала A , плотности $\gamma = \frac{m}{q}$ и относительной деформации $i = \frac{\delta}{h}$ напряжение на поверхности получает конкретное выражение как вектор, характеризуемый не только величиной, но и направлением. При умножении напряжения на деформацию тела, на котором совершается работа, получаем скалярное произведение векторов $R \cdot \delta$ ($\text{Н}\cdot\text{м}/\text{м}^2$), выражающее удельную поверхностную энергию, не зависящую от направлений векторов.

В дальнейшем требуется вычислить фактические значения энергетических уровней материалов при их переработке, для чего нужно экспериментально определить удельную поверхностную энергию $R \cdot \delta$ ($\text{Дж}/\text{см}^2$), плотность массы γ ($\text{г}/\text{см}^3$) и глубину проникновения энергии в массу h (см), причем $\varepsilon = \frac{R\delta}{h\gamma}$, и при фактических удельных затратах энергии \mathcal{E} ($\text{Дж}/\text{г}$) величина КПД $k = \varepsilon/\mathcal{E}$.

Определение энергетических констант A , a , на которых основываются все энергетические расчеты, требует оценки критических уровней (предельных значений энергетических уровней), на которых изменяется качественное состояние перерабатываемых материалов.

Библиографический список

1. Андреев С. Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / С. Е. Андреев, В. А. Перов, В. В. Зверевич. – 3-е изд. – М. : Недра, 1980. – 415 с.

2. Андреев С. Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / С. Е. Андреев, В. В. Зверевич, В. А. Перов. – 2-е изд. – М. : Недра, 1966. – 395 с.

3. Бауман В. А. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций (общий курс) : учебник / В. А. Бауман, Б. В. Клушанцев, В. Д. Мартынов. – М. : Машиностроение, 1975. – 351 с.

4. Егоров А. В. Основные процессы и оборудование в технологии строительных материалов : учеб. пособие / А. В. Егоров, А. Л. Рульнов. – М. : ВЗИСИ, 1998. – 80 с.

5. Егоров Г. Г. Теория и практика дробления и тонкого измельчения / Г. Г. Егоров. – М. : НКТП, 1932. – 235 с.

6. Клушанцев Б. В. Дробилки. Конструкция, расчет особенности эксплуатации / Б. В. Клушанцев, А. И. Косарев, Ю. А. Муйземнек. – М. : Машиностроение, 1990. – 332 с.

7. Левенсон Л. Б. Производство щебня. Основы технологии и оборудование / Л. Б. Левенсон, Г. М. Клюев. – М. : Госстройиздат, 1959. – 266 с.

8. Серго Е. Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых : учебник / Е. Е. Серго. – М. : Недра, 1985. – 285 с. – (Сер. Высшее образование).

9. Олевский В. И. Конструкция, расчет и эксплуатация дробилок / В. И. Олевский. – М. : Металлургиздат, 1958. – 459 с.

10. Чаус К. В. Технология производства строительных материалов, изделий и конструкций : учебник для вузов / К. В. Чаус, Ю. Д. Чистов, Ю. В. Лабзина. – М. : Стройиздат, 1988. – 448 с.

Дата поступления: 31.05.2019

Решение о публикации: 07.06.2019

Контактная информация:

КАХАРОВ Зайтжан Васидович – ст. преподаватель; kzv1965@mail.ru

ЭШОНОВ Фарход Фаизуллахужаевич – ассистент; far-hod83@mail.ru

КОЗЛОВ Иван Сергеевич – канд. техн. наук, доцент; kozlovi.s@yandex.ru

Evaluation of material power constants during shattering of solids

Z. V. Kakharov¹, F. F. Ashonov¹, I. S. Kozlov²

¹ Tashkent Railway Engineering Institute, 1, Adylkhodzhaev ul., Tashkent, 100167, The Republic of Uzbekistan

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

For citation: Kakharov Z. V., Ashonov F. F., Kozlov I. S. Evaluation of material power constants during shattering of solids. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 3, pp. 499–504. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-499-504 (In Russian)

Summary

Objective: To consider the issue of optimizing maintenance indices during the evaluation of material power constants and their critical mass in the process of shattering of solids. **Methods:** Energy-dispersive analysis of building processes was carried out during shattering procedure of mineral materials performed by crushing machines of different constructions, grinding and other types of mills thus obtaining bulk material (crushed rock of different size, chips, sand, etc.). **Results:** Material power constants as well as their critical mass were evaluated being vitally important for estimation of material properties and breaking strength in different interaction processes with external effects. The results of rock grinding processes performed by crushing machines as well as samples of pressed concrete were presented. **Practical importance:** The value of power concrete constant was determined, characterizing it to the fullest extent possible, taking into account all its physical properties which affect the resistance to external effects. The developed methods are advisable for practical application.

Keywords: Crushed rock, chips, shattering of solid bodies, crushing of solid body, crushing stress, bulk and relative deformation.

References

1. Andreev S. E., Perov V. A. & Zverevich V. V. *Drobleniye, izmelcheniye i grokhocheniye poleznykh iskopayemykh* [Shattering, grinding and screening of mineral resources]. 3-e publ. Moscow, Nedra Publ., 1980, 415 p. (In Russian)

2. Andreev S. E., Zverevich V. V. & Perov V. A. *Drobleniye, izmelcheniye i grokhocheniye poleznykh iskopayemykh* [Shattering, grinding and screening of mineral resources]. 2-e publ. Moscow, Nedra Publ., 1966, 395 p. (In Russian)

3. Bauman V. A., Klushantsev B. V. & Martynov V. D. *Mekhanicheskoye oborudovaniye predpriyatiy stroitelnykh materialov, izdeliy i konstruksii (obshchiy kurs)*. Uchebnik [Machinery for manufacturers of building materials, items of equipment and design (general course). Textbook]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1975, 351 p. (In Russian)

4. Egorov A. V. & Rulnov A. L. *Osnovniye protsessy i oborudovaniye v tekhnologii stroitelnykh materialov*. Ucheb. posobiye [Basic processes and equipment in the production method of construction materials]. Manual. Moscow, VZICI [All-Union Correspondence Institution of Civil Engineering] Publ., 1998, 80 p. (In Russian)

5. Egorov G. G. *Teoriya i praktika drobleniya i tonkogo izmelcheniya* [Theory and practice of shattering and fine crushing]. Moscow, NKTP [People's Commissariat for Heavy Industry] Publ., 1932, 235 p. (In Russian)

6. Klushantsev B. V., Kosarev A. I. & Muizemnek Yu. A. *Drobnikiy. Konstruksiya, raschet osobennosty ekspluatatsii* [Crushing machines. Design, the analysis of operation specificities]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1990, 332 p. (In Russian)

7. Levenson L. B. & Klyuev G. M. *Proizvodstvo shchebnya. Osnovy tekhnologii i oborudovaniye* [The

production of ballast. Manufacturing science and equipment]. Moscow, Gosstroizdat Publ., 1959, 266 p. (In Russian)

8. Sergo E. E. *Drobleniye, izmelcheniye i grokhotcheniye poleznykh iskopaemykh*. Uchebnik [*Shattering, grinding and screening of mineral resources*. Textbook]. Moscow, Nedra Publ., 1985, 285 p. (Series of Higher education). (In Russian)

9. Olevskiy V.I. *Konstruktsiya, raschet i ekspluatatsiya dробилок* [*Construction, calculation and maintenance of crushing machines*]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1958, 459 p. (In Russian)

10. Chaus K. V., Chistov Y. D. & Labzina Y. V. *Tekhnologiya proizvodstva stroitelnykh materialov, izdeliy i*

konstruktsiy. Uchebnik dliya vusov [*Manufacturing technologies for construction materials, items of equipment and design*. College textbook]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988, 448 p. (In Russian)

Received: May 31, 2019

Accepted: June 07, 2019

Author's information:

Zaitzhan V. KAKHAROV – Senior Lecturer; kzv1965@mail.ru

Farkhod F. ASHONOV – Assistant; far-hod83@mail.ru

Ivan S. KOZLOV – Cand. Sci. in Engineering, Associate Professor; kozlovi.s@yandex.ru

УДК 629.4.028.86

Расчет силовых характеристик фрикционного поглощающего аппарата с применением метода конечных элементов

А. А. Никитченко¹, Д. В. Шевченко¹, В. А. Дубинский²

¹ Всесоюзный научно-исследовательский центр транспортных технологий, Российская Федерация, 199106, Санкт-Петербург, 23-я линия Васильевского острова, 2, лит. А

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

Для цитирования: *Никитченко А. А., Шевченко Д. В., Дубинский В. А.* Расчет силовых характеристик фрикционного поглощающего аппарата с применением метода конечных элементов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 3–4. – С. 505–514. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-505-514

Аннотация

Цель: Проведение расчетных исследований, позволяющих учитывать физическую (пластическое поведение материалов) и геометрическую (контактное взаимодействие, значительные перемещения и деформации) нелинейности, которые возникают при работе поглощающих аппаратов. **Методы:** Проведены теоретические исследования с применением ранее разработанных аналитических методов и метода нелинейного динамического анализа, реализованного в программной системе NX Siemens. **Результаты:** Построена конечно-элементная расчетная модель упруго-фрикционного поглощающего аппарата, в которой учтены нелинейность характеристики подпорного блока и нелинейные свойства материалов, из которых изготовлены его детали. На примере поглощающего аппарата наиболее простой конструкции продемонстрированы возможности использования нелинейного динамического анализа в программной системе NX Siemens. **Практическая значимость:** В связи с возрастанием осевых нагрузок и массой грузовых вагонов важной и актуальной задачей является разработка поглощающих аппаратов с улучшенными характеристиками. Применение новых методов и расчетных программ на их основе дает возможность более точно в сравнении с аналитическими методами определять не только силовые, но и прочностные характеристики поглощающих аппаратов. Также моделирование работы материалов в зоне пластических деформаций позволяет оценить не только напряжения, возникающие в процессе работы аппарата, но и остаточные деформации, приводящие к изменению геометрии деталей и как следствие силовых характеристик поглощающего аппарата при последующих ударных сжатиях.

Ключевые слова: Поглощающий аппарат, силовая характеристика, энергоемкость, нелинейный динамический анализ, метод конечных элементов, программная система NX Nastran.

Введение

Поглощающий аппарат является важным элементом грузового вагона, задача которого состоит в том, чтобы продольные силы, передаваемые через автосцепку, не превысили нормируемых значений, при которых обеспечивается прочность. В настоящее время упруго-фрикционные поглощающие аппара-

ты наиболее широко используются в грузовом и пассажирском подвижном составе во всех странах мира. Таким образом, расчет и проектирование поглощающих аппаратов с улучшенными технико-экономическими характеристиками – важные и актуальные задачи для многих вагоностроительных предприятий.

В подавляющем большинстве научно-исследовательских работ (см., например, [1–3]),

посвященных вопросам определения параметров упруго-фрикционных поглощающих аппаратов, расчетная модель рассматривается как система абсолютно твердых тел, связанных между собой силовыми и кинематическими зависимостями. Движение элементов поглощающих аппаратов представлено системой дифференциальных уравнений, решая которую можно определить требуемые характеристики. При этом уравнения составляются без использования методов автоматического синтеза и в зависимости от детализации расчетной модели могут получиться довольно громоздкими. При таком подходе высока вероятность появления ошибок как на стадии составления самих уравнений, так и на этапе их алгоритмической реализации в расчетных программах.

Вместе с тем в небольших объемах проводились работы по расчету характеристик поглощающих аппаратов с применением методов, не требующих «ручного» составления дифференциальных уравнений. Например, были рассчитаны силовые характеристики упругофрикционного поглощающего аппарата, конструктивно близкого к модели АПМ-120-Т1, с применением программной системы NX Motion [4], которая позволяет решать задачи динамики механических систем, состоящих из абсолютно твердых тел. Получена хорошая сходимость с ранее разработанными аналитическими моделями, представленными в [5], и с результатами натурных испытаний [6].

Следует отметить, что представление расчетной модели поглощающего аппарата в виде системы, состоящей из абсолютно твердых тел, даже с применением современных технологий не совсем корректно. Это обусловлено тем, что в процессе ударного сжатия детали аппарата испытывают довольно значительные деформации, которые приводят к возникновению автоколебательных процессов, скачкообразному изменению сил за счет сложного контактного взаимодействия между деталями и других к настоящему времени недостаточно изученных явлений.

Указанных недостатков лишен метод нелинейного динамического анализа, позволяю-

щий учитывать упруго-пластическое поведение отдельных частей и сложное контактное взаимодействие. В работе [7] произведен обзор возможностей применения нелинейного динамического анализа и приведены тестовые расчеты, которые можно сопоставить с результатами, полученными аналитическими методами.

Методы и результаты

Рассматриваемый прототип фрикционного поглощающего аппарата (рис. 1) имеет наиболее простую конструкцию. Исследованиями, проведенными аналитическими методами, установлено, что данная конструкция при определенном сочетании характеристик пружины и углов клиновой системы позволяет достичь показателей, соответствующих классу Т1. Ключевым параметром, который определяет класс поглощающего аппарата, является его энергоемкость. В соответствии с [8] энергоемкость аппарата должна быть не менее:

- 70 кДж при ударной нагрузке, приложенной к нажимному конусу, не более 2,0 МН;
- 90 кДж при ударной нагрузке, приложенной к нажимному конусу, не более 3,0 МН.

Поглощающий аппарат класса Т1 наиболее распространен и предназначен для вагонов, перевозящих все виды грузов (кроме опасных), а также для маневровых локомотивов массой до 100 т включительно. В сравнении с используемыми на грузовых вагонах моделями фрикционных поглощающих аппаратов ПМКП-110 и АПМ-120-Т1 он не имеет сложных в изготовлении пластин с металлокерамикой и как следствие его себестоимость более низкая.

Несмотря на относительную простоту конструкции, изготовление опытных образцов для проведения испытаний и определения на их основе параметров пружины и клиновой системы – довольно длительный и трудоемкий процесс. Поэтому использование аналитических методов и нелинейного динамического анализа для получения более точных результатов является важной и актуальной задачей.

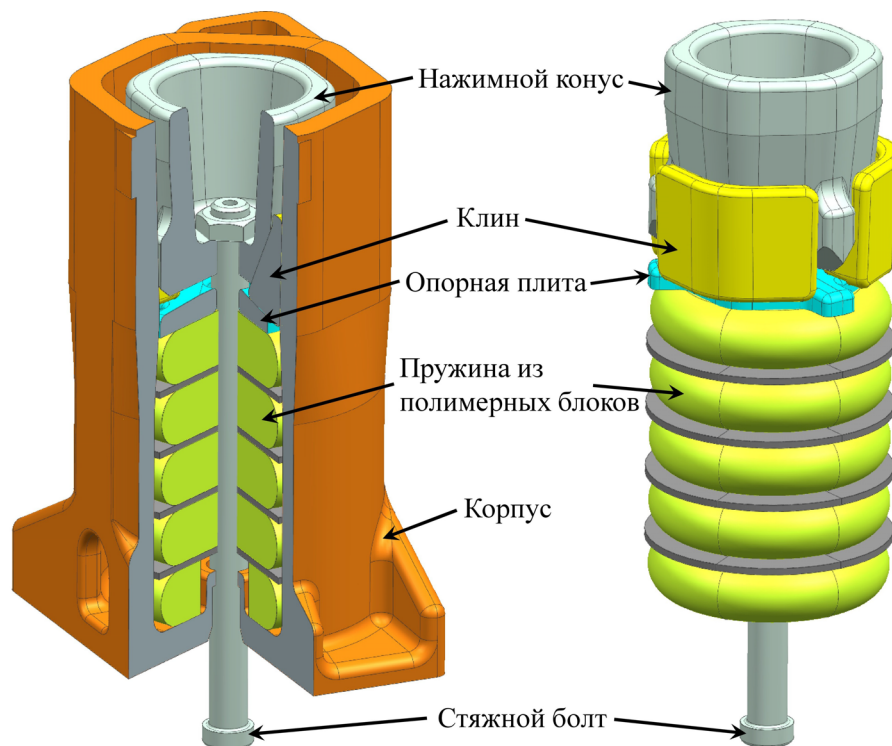


Рис. 1. Устройство поглощающего аппарата

Расчетная схема аналитической модели приведена на рис. 2. Аналогичные клиновые системы применяются не только в амортизаторах удара, но и в других механических системах, в частности клиновых гасителях колебаний тележки грузового вагона.

Составляя для каждого из элементов клиновой системы уравнения равновесия, получим дифференциальное уравнение движения

$$\ddot{x} = g \frac{M_g}{M_a} - \frac{P(x, \dot{x})}{M_a},$$

где M_g – масса движущихся элементов, приведенная к силам тяжести; M_a – масса движущихся элементов, приведенная к ускорениям; g – ускорение свободного падения; $P(x, \dot{x})$ – приведенная сила сжатия подпорного блока.

Теоретические основы нелинейного динамического анализа изложены в [9], методы и алгоритмы, используемые при решении задач в программной системе конечно-элементного анализа NX Advanced, представлены в [10]. Для решения рассматриваемой задачи приме-

нен неявный решатель, с настройками, которые позволяют получить сходимость решения, при этом подавить высокочастотные осцилляции и не внести искажения в общую энергию системы.

Уравнение движения с учетом опции низкоскоростной динамики задается уравнением

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}_{t+\Delta t} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}}_{t+\Delta t} + \mathbf{K}\Delta\mathbf{U}_{t+\Delta t} = \mathbf{R}_{t+\Delta t} - \mathbf{F}_{t+\Delta t}. \quad (1)$$

В (1) \mathbf{M} – обобщенная матрица масс, \mathbf{K} – матрица жесткости, \mathbf{C} – матрица демпфирования, \mathbf{R} – вектор внешних нагрузок, приложенных в момент времени $t = \Delta t$, \mathbf{F} – вектор усилий в узлах, возникающих в момент времени $t = \Delta t$, $\ddot{\mathbf{U}}$, $\dot{\mathbf{U}}$, \mathbf{U} – ускорения, скорости и перемещения узлов соответственно.

Матрица демпфирования вычисляется по формуле

$$\mathbf{C} = \beta\mathbf{K},$$

где β – константа демпфирования Рэлея.

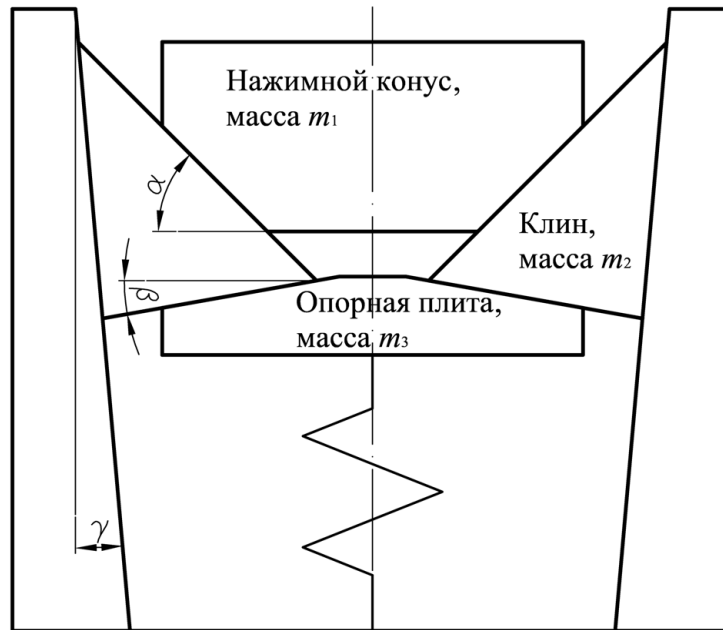


Рис. 2. Расчетная схема аналитической модели

Для уменьшения размерности задачи в данной модели использовано свойство симметрии. Модель состоит из 10-узловых квадратичных элементов. Чтобы достичь требуемой нормативными документами энергоемкости, подпорный блок поглощающего аппарата приходится изготавливать из полимерных материалов, так как стальные пружины с необходимыми параметрами не помещаются во внутреннем пространстве аппарата. Вследствие этого подпорный блок имеет нелинейную вогнутую характеристику. В конечно-элементной (КЭ) модели для моделирования нелинейной пружины предусмотрен элемент, для которого в табличном виде задается зависимость усилия от величины сжатия, представленная на рис. 3. Нижний конец пружины закреплен, а верхний соединен с узлами нижней поверхности опорной плиты.

Проведем сравнительный расчет для следующих исходных данных:

- масса падающего груза $m_{гр} = 10\,000$ кг;
- углы клиновой системы: $\alpha = 57^\circ$, $\beta = 7^\circ$, $\gamma = 2^\circ$;
- ускорение свободного падения g равно $9,81$ м/с²;

– жесткость пружины представлена верхней ветвью графика на рис. 3;

– коэффициенты трения постоянны и равны $f = 0,2$;

– начальная скорость падения груза $V_0 = 4$ м/с;

– материал корпуса – Сталь 35 НГМЛ с механическими характеристиками: предел текучести $\sigma_t = 589$ МПа, предел прочности $\sigma_b = 763$ МПа, материал остальных деталей – Сталь 38ХС с механическими характеристиками: предел текучести $\sigma_t = 540$ МПа, предел прочности $\sigma_b = 685$ МПа.

Применяемый метод нелинейного динамического анализа позволяет учесть работу материала в области напряжений, превышающих предел текучести. Аналитическое описание диаграммы деформирования материала выполнено на основании механических характеристик по методу Банкина–Дзюбы–Хватана [11].

На каждом шаге интегрирования получены поузловые значения перемещений, скоростей, напряжений, реакций в узлах, к которым приложены граничные условия и прочие параметры. По этим результатам произведен расчет

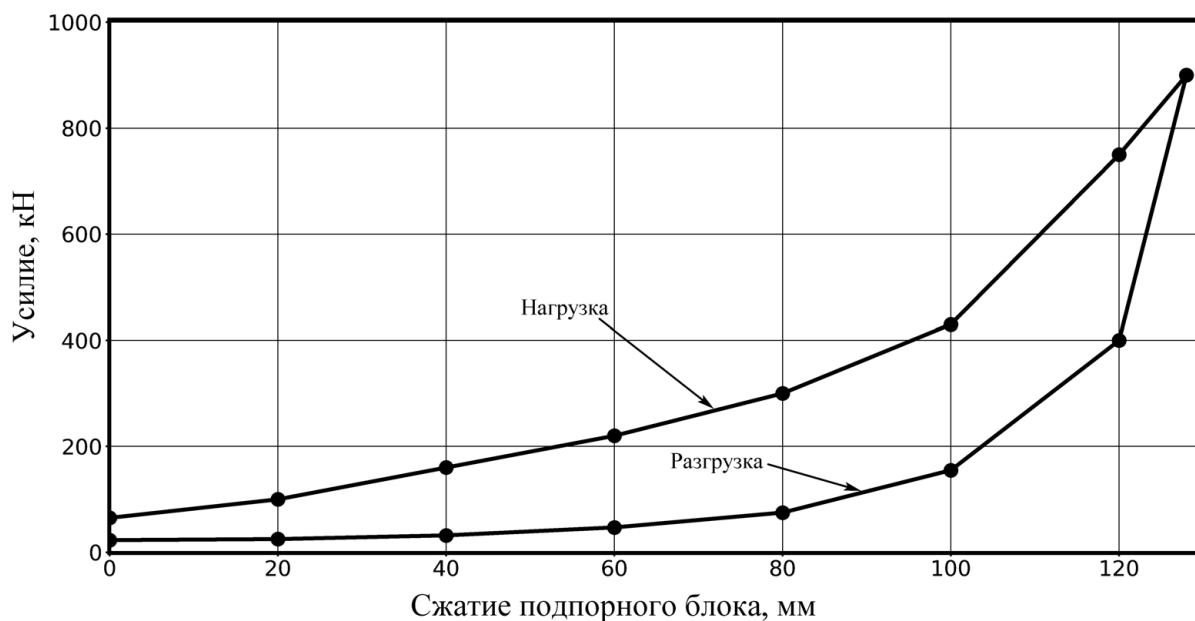


Рис. 3. Нелинейная характеристика подпорного блока, используемого в конструкции поглощающего аппарата

энергоемкости, для которого применена формула трапеций

$$E_{i+1} = E_i + \frac{P_i + P_{i+1}}{2} \cdot (x_{i+1} - x_i), \quad (2)$$

где E_i – энергия на i -м шаге; P_i – суммарная вертикальная реакция на закрепленных узлах корпуса аппарата и пружине; x_i – усредненное перемещение узлов нажимного конуса,

На рис. 4, а–в представлены сравнительные результаты, полученные аналитическими методами и с применением нелинейного динамического анализа.

Из диаграммы «время–перемещение» на рис. 4, а видна хорошая сходимость результатов, особенно на этапе сжатия. На диаграммах «время–сила» и «перемещение–сила» (рис. 4, б, в) хорошо заметен сильный автоколебательный процесс, который обусловлен в большей степени упругими свойствами корпуса аппарата и наличием сухого трения между его деталями [12, 13].

Полученные значения энергоемкости аппарата, вычисленные по формуле (2), отличаются на 2,3% и составляют: 84,1 кДж – аналити-

ческим методом, 82,2 кДж – с применением нелинейного динамического анализа.

На рис. 5 представлено напряженное состояние деталей в момент максимального сжатия, когда напряжения достигают максимальных значений. Напряжения в некоторых зонах существенно превышают предел текучести, что вызывает появление остаточных деформаций. Из этого следует, что при каждом последующем ударном сжатии поглощающего аппарата будут меняться форма и размеры его деталей, что может привести к изменению силовых характеристик. Из опыта эксплуатации фрикционных поглощающих аппаратов известно, что случаи «раздувания» корпуса не редкость, поэтому необходимо, чтобы корпус был изготовлен из стали с пределом текучести не менее 700 МПа.

Заключение

Проведен расчет ударного сжатия поглощающего аппарата с использованием нелинейного динамического анализа. Получена удовлетворительная сходимость результатов,

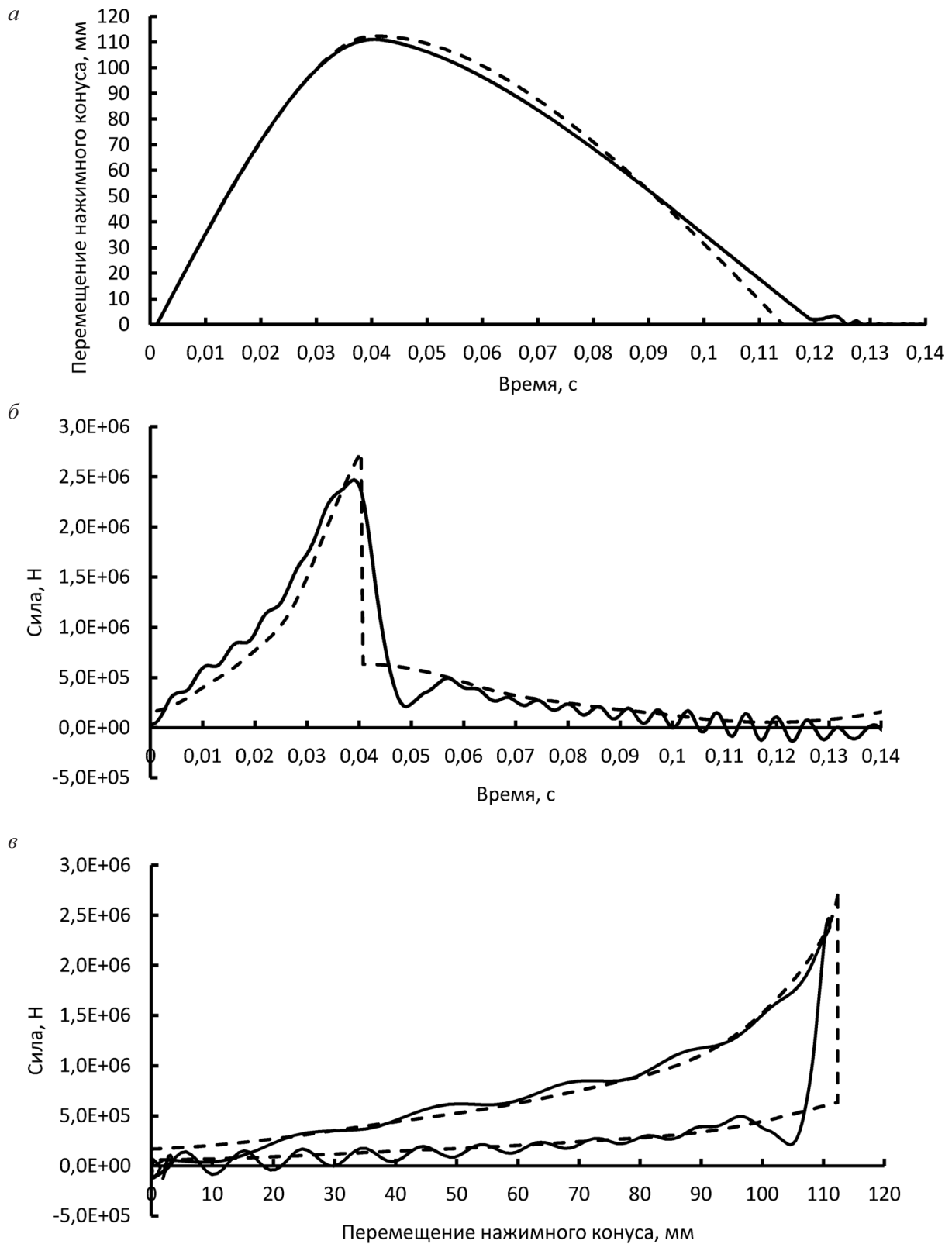


Рис. 4. Изменение перемещения нажимного конуса во времени (*a*), усилия во времени (*б*) и силовая характеристика аппарата (*в*): сплошная линия – нелинейный динамический анализ; пунктирная – аналитическое решение

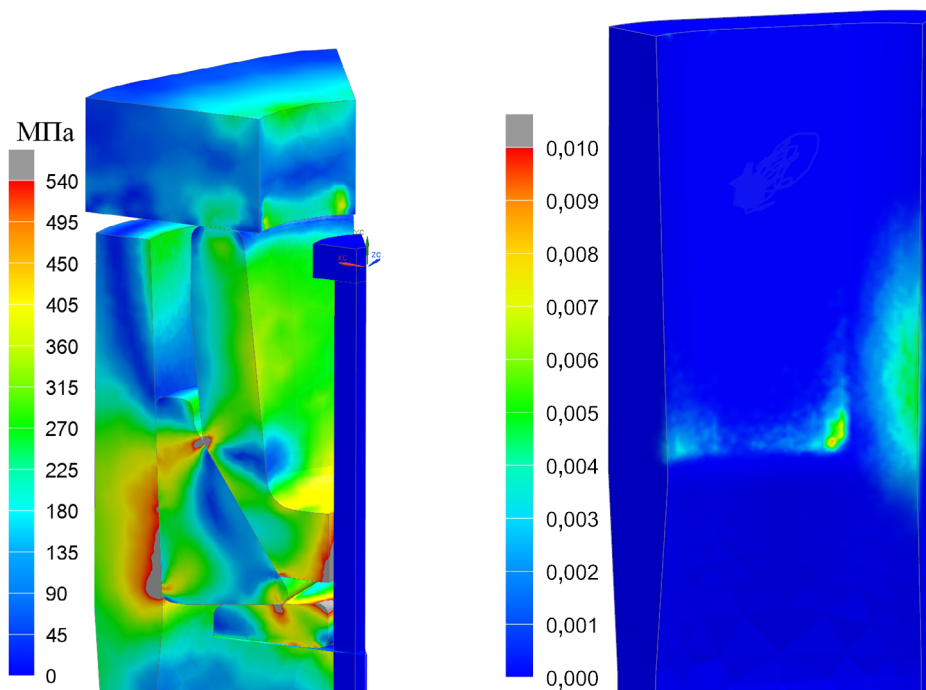


Рис. 5. Напряженно-деформированное состояние деталей в момент максимального сжатия (слева) и остаточные деформации корпуса аппарата после возврата в исходное положение (справа)

особенно по таким параметрам как максимальное перемещение и максимальная сила. При этом есть все основания считать результаты, полученные с применением нелинейного динамического анализа, более точными, так как учитываются многие факторы, которые невозможно принять во внимание при расчете аналитическими методами.

Следует отметить, что напряжения в некоторых зонах превысили предел текучести материала, поэтому прототип для натурных испытаний следует изготавливать из материалов с пределом текучести не менее 700 МПа.

Разработанная в процессе решения данной задачи методика может быть использована для поглощающих аппаратов более сложных конструкций, в том числе в которых применены материалы с высокой нелинейностью, такие как эластомеры, гидравлические вставки и т. д.

Недостатком применения нелинейного динамического анализа является то, что даже при использовании мощной вычислительной

техники расчет одного нагружения занимает довольно продолжительное время, поэтому аналитические методы расчета в ближайшем будущем не утратят своей актуальности. Наиболее рациональный подход будет заключаться в прогнозировании характеристик аппарата аналитическими методами с последующим уточнением с помощью нелинейного динамического анализа.

Библиографический список

1. Болдырев А. П. Расчет и проектирование амортизаторов удара подвижного состава / А. П. Болдырев, Б. Г. Кеглин. – М. : Машиностроение, 2004. – 198 с.
2. Манашкин Л. А. Гасители колебаний и амортизаторы ударов рельсовых экипажей (математические модели) : монография / Л. А. Манашкин, С. В. Мямлин, В. И. Приходько. – Днепропетровск : АРТ-Пресс, 2007. – 196 с.

3. Гайворонский Е. Г. Фрикционные автоколебания в поглощающем аппарате автосцепки / Е. Г. Гайворонский // Вестн. Брянск. гос. технич. ун-та. – 2013. – № 1. – С. 23–26.
4. Nikitchenko A. Modeling of operation of elastic-friction draft gear by NX Motion software / A. Nikitchenko, V. Artiukh, D. Shevchenko // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 187. – P. 790–796.
5. Никитченко А. А. Разработка математической модели фрикционно-полимерного поглощающего аппарата / А. А. Никитченко С. В. Мямлин, Н. Е. Науменко // Вестн. Днепропетровск. нац. ун-та ж.-д. транспорта им. академика В. Лазаряна. – 2008. – № 24. – С. 25–33.
6. Отчет по предварительным испытаниям опытной партии поглощающих аппаратов модели АПМ-120-Т1 (Копровые испытания и испытания при соударении вагонов). – Мариуполь : «ИЦ “Азов-маштест”»; ИЦ ПВ ГП УкрНИИВ. – 19.10.2007.
7. Nikitchenko A. Application of nonlinear dynamic analysis for calculation of dynamics and strength of mechanical systems / A. Nikitchenko, V. Artiukh, D. Shevchenko, A. Larionov, I. Zubareva // *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018*. – P. 496–510.
8. ГОСТ 32913–2014. Аппараты поглощающие сцепных и автосцепных устройств железнодорожного подвижного состава. Технические требования и правила приемки. – М. : Стандартинформ, 2014.
9. Бате К.-Ю. Методы конечных элементов / К.-Ю. Бате. – М. : Физматлит, 2010. – 1022 с.
10. NX Nastran 10. Advanced nonlinear theory and modeling guide. – Siemens Product Lifecycle Management Software Inc., 2014. – 480 p.
11. Банкин О. С. Метод построения диаграммы деформирования « $\sigma - \varepsilon$ » по справочным механическим характеристикам материала / О. С. Банкин, А. С. Дзюба, А. М. Хватан. – URL : <https://cae-club.ru> (дата обращения : 30.09.2019).
12. Кудрявцев М. А. Автосцепка СА-3Т для вагонов тяжеловесного движения : особенности конструкции и технологии изготовления / М. А. Кудрявцев, Д. В. Шевченко, А. М. Орлова // *Вагоны и вагонное хозяйство*. – 2018. – № 1 (53). – С. 30–32.
13. Шамберов В. Н. Метод аналитического исследования влияния сухого трения на поведение авторегулируемых динамических систем / В. Н. Шамберов // *Науч. приборостроение*. – 2003. – Т. 13, № 3. – С. 77–83.

Дата поступления: 02.09.2019

Решение о публикации: 10.10.2019

Контактная информация:

НИКИТЧЕНКО Андрей Андреевич – канд. техн. наук; anikitchenko@tt-center.ru
 ШЕВЧЕНКО Денис Владимирович – канд. техн. наук; dshevchenko@tt-center.ru
 ДУБИНСКИЙ Владимир Александрович – канд. техн. наук; vdubinski@yandex.ru

Calculation of the force characteristics of the friction draft gears using the finite element method

A. A. Nikitchenko¹, D. V. Shevchenko¹, V. A. Dubinskiy²

¹ All-Union Research and Development Centre of Transportation Technology, 2, lit. A, 23-ia liniia, Vasilevskiy Island, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation

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

For citation: *Nikitchenko A. A., Shevchenko D. V., Dubinskiy V. A. Calculation of the force characteristics of the friction draft gears using the finite element method. Proceedings of Petersburg Transport University, 2019, vol. 16, iss. 3, pp. 505–514. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-505-514 (In Russian)*

Summary

Objective: Demonstration of possibilities of application of modern methods which allow considering various factors in research of work of draft gears. Carrying out of calculation studies accounting for physical (plastic response) and geometrical (contact interactions, significant displacement and deformations) nonlinearities occurring in operation of draft gears. **Methods:** Theoretical studies using previously developed analytical methods and the method of nonlinear dynamic analysis implemented in the software system NX Siemens were carried out. **Results:** An analysis of theoretical bases of the calculation methods incorporated in the NX Siemens software system is carried out. A finite-element computational model of the elastic-friction draft gear is constructed, which takes into account the nonlinearity of the characteristics of the retaining block and the nonlinear properties of the materials from which its parts are made. An example of draft gear of the simplest design demonstrates the possibility of using nonlinear dynamic analysis software NX Siemens. **Practical importance:** Due to the increase in axial loads and the weight of cargo wagons, development of draft gears with improved characteristics is an important and urgent task. Application of new methods and calculation programs on their basis allows determining not only force, but also strength characteristics of draft gears more precisely in comparison with analytical methods. Also, the modelling of materials' operation in the area of plastic deformation allows evaluating not only the stresses arising during the operation of the device, but also the residual deformations that lead to changes in the geometry of the parts and as a result of the force characteristics of the draft gear during subsequent shock compressions.

Keywords: Draft gear, force characteristic, power capacity, nonlinear dynamic analysis, finite element method, program system NX Nastran.

References

1. Boldyrev A. P. & Keglin B. G. *Raschet i proektirovanie amortizatorov udara podvznogo sostava* [Calculation and design of shock absorbers of rolling stock]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004, 198 p. (In Russian)
2. Manashkin L. A., Miamlin S. V. & Prikhod'ko V. I. *Gasiteli kolebanii i amortizatory udarov rel'sovykh ekipazhei (matematicheskie modeli)*. Monografiia [Vibration dampers and shock absorbers for rail carriages (Mathematical models)]. Monograph]. Dnepropetrovsk, ART-Press Publ., 2007, 196 p. (In Russian)
3. Gaivoronskii E. G. Friksionnie avtokolebaniia v pogloshchaiushchem apparate avtostsepki [Frictional self-oscillations in the automatic coupler absorbing device]. *Vestnik Brianskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Bryansk State Technical University], 2013, no. 1, pp. 23–26 (In Russian)
4. Nikitchenko A., Artiukh V. & Shevchenko D. Modeling of operation of elastic-friction draft gear by NX Motion software. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 187, pp. 790–796.
5. Nikitchenko A. A., Miamlin S. V. & Naumenko N. E. Razrabotka matematicheskoi modeli friktsionno-polimernogo pogloshchaiushchego apparata [Development of a mathematical model of frictional-polymeric draft gear]. *Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta im. akademika V. Lazarian* [Bulletin of Dnipropetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazarian], 2008, no. 24, pp. 25–33. (In Russian)
6. *Otchet po predvaritel'nym ispitaniiam opytnoi partii pogloshchaiushchikh apparatov modeli APM-120-T1 (Koprovie ispytaniia i ispytaniia pri soudarenii vagonov)* [Report on preliminary tests of the experimental batch of draft gears model APM-120-T1 (Drop tests and tests at collision of wagons)]. Mariy-pol': Azovmashtest test centre and PV GP UkrNIIV test centre Publ., 19.10.2007. (In Russian)
7. Nikitchenko A., Artiukh V., Shevchenko D., Lariov A. & Zubareva I. Application of nonlinear dynamic analysis for calculation of dynamics and strength of mechanical systems. *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018*, pp. 496–510.

8. *State Standard GOST 32913–2014. Apparaty pogloshchaiushchie stsepykh i avtostsepykh ustroystv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Tekhnicheskie trebovaniia i pravila priemki [Draft gears of coupling and automatic coupling devices of railway rolling stock. Technical requirements and acceptance rules]*. Moscow, Standartinform Publ., 2014. (In Russian)

9. Bathe K.-Yu. *Metody konechnykh elementov [Finite element procedures]*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010, 1022 p. (In Russian)

10. *NX Nastran 10. Advanced nonlinear theory and modeling guide*. Siemens Product Lifecycle Management Software Inc., 2014, 480 p.

11. Bankin O. S., Dziuba A. S. & Khvatan A. M. *Method postroeniia diagrammy deformirovaniia "σ – ε" po spravochnym mekhanicheskim kharakteristikam materiala [Method of constructing deformation diagrams of "σ – ε" by reference to the mechanical characteristics of the material]*. Available at: <https://cae-club.ru> (accessed: 30.09.2019). (In Russian)

12. Kudriavtsev V.A., Shevchenko D.V. & Orlova A.M. Avtostsepka SA-3T dlia vagonov tiazhelove-

snogo dvizheniia: osobennosti konstruksii i tekhnologii izgotovleniia [Automatic coupler CA-3T for heavy-lift wagons: design features and manufacturing techniques]. *Vagony i vagonnoe khoziaistvo [Wagons and rolling stock]*, 2018, no. 1 (53), pp. 30–32. (In Russian)

13. Shamberov V.N. Metod analiticheskogo issledovaniia vliianiia sukhogo treniia na povedenie avtoreguliruemyykh dinamicheskikh sistem [Method of analytical study of dry friction effect on the behaviour of automatic dynamic systems]. *Nauchnoe priborostroenie [Scientific instrument engineering]*, 2003, vol. 13, no. 3, pp. 77–83. (In Russian)

Received: September 02, 2019

Accepted: October 10, 2019

Author's information:

Andrei A. NIKITCHENKO – Cand. Sci. in Engineering; anikitchenko@tt-center.ru

Denis V. SHEVCHENKO – Cand. Sci. in Engineering; dshevchenko@tt-center.ru

Vladimir A. DUBINSKII – Cand. Sci. in Engineering; vdubinski@yandex.ru

УДК 621.51/54.02.001.2 (075.8)

Повышение энергетической эффективности систем снабжения промышленных предприятий сжатым воздухом

С. И. Степанов, И. В. Митрофанова

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

Для цитирования: Степанов С. И., Митрофанова И. В. Повышение энергетической эффективности систем снабжения промышленных предприятий сжатым воздухом // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 3. – С. 515-522.

DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-515-522

Аннотация

Цель: Оценка эффективности децентрализованных систем снабжения сжатым воздухом на базе автоматизированных воздушных винтовых компрессоров. **Методы:** Сравниваются характеристики централизованных систем снабжения сжатым воздухом, спроектированных на основе воздушных поршневых компрессоров, с децентрализованными системами на базе автоматизированных винтовых компрессоров; определяется эффективность децентрализации и автоматизации систем снабжения сжатым воздухом. **Результаты:** Выявлены недостатки энергетической эффективности централизованных систем подачи сжатого воздуха. Исследованы возможности экономии эксплуатационных расходов благодаря децентрализации систем подачи сжатого воздуха с установкой автоматических винтовых компрессоров. Представлен метод экспресс-оценки повышения энергетической эффективности от децентрализации системы снабжения сжатым воздухом с помощью воздушных винтовых компрессоров. Определен процент сокращения стоимости эксплуатационных затрат в системах снабжения сжатым воздухом. **Практическая значимость:** Предложенный метод оценки энергетической эффективности децентрализации системы сжатого воздуха на базе винтовых воздушных компрессоров может быть рекомендован для практического использования.

Ключевые слова: Воздушный винтовой компрессор, эффективность применения, система снабжения сжатым воздухом, потенциал экономии в производстве сжатого воздуха, потенциал снижения эксплуатационных затрат.

Введение

Сжатый воздух используется на многих промышленных предприятиях и депо железнодорожного транспорта в пневматическом оборудовании различного назначения – машины, механизмы, дозаторы, захваты и инструменты.

Большинство промышленных предприятий и железнодорожных депо до настоящего времени эксплуатирует централизованную систему снабжения сжатым воздухом, применяя

единую компрессорную станцию (КС) с протяженной и разветвленной воздушной сетью магистральных и цеховых воздухопроводов. Протяженность сетей централизованных систем снабжения сжатым воздухом изменяется от сотен метров до нескольких километров, что обуславливает наличие значительных затрат на их содержание.

В условиях конкуренции на внутреннем и внешних рынках предприятия вынуждены искать возможности снижения себестоимости производства продукции и оказания услуг, свя-

занные с автоматизацией производственных процессов и энергосбережением. В этих целях все более широко используется децентрализация систем снабжения сжатым воздухом на основе применения автоматизированных воздушных винтовых компрессоров.

Характеристика традиционных систем снабжения сжатым воздухом

Изначально, в 70–80-е годы XX в., при проектировании централизованных систем снабжения сжатым воздухом для промышленных предприятий руководствовались объективными причинами, обусловленными уровнем развития и автоматизации компрессорных установок, обладающих преимуществами по сравнению с децентрализованным снабжением сжатым воздухом:

- снижение удельного расхода электроэнергии на привод компрессоров при повышении их производительности;
- увеличение моторесурса компрессорных установок с ростом их производительности;
- понижение затрат на обслуживание КС при уменьшении количества компрессоров (затраты на техническое обслуживание, ремонт, оплату труда обслуживающего персонала);
- равномерная загрузка компрессоров централизованной КС за счет сглаживания нагрузок от многочисленных потребителей сжатого воздуха;
- обеспечение маневренности на покрытие пиковых и малых нагрузок централизованной КС при сохранении высокой энергетической эффективности работы отдельных компрессоров;
- понижение трудоемкости технического обслуживания за счет унификации компрессоров, устанавливаемых на централизованной КС (однотипные запасные части, инструменты и принадлежности, смазочные материалы и т. п.);
- менее затратная автоматизация работы крупной КС на существующей в то время релейной базе.

В подавляющем большинстве централизованные КС оборудованы двухступенчатыми поршневыми компрессорными установками производительностью (по условиям всасывания) от 20 до 200 $\text{м}^3/\text{мин}$ и давлением до 0,8 МПа, работающими с водяным охлаждением. Эти компрессорные установки имеют относительно низкий удельный расход электроэнергии на привод – 0,10–0,12 (кВт·ч)/ м^3 , что и определило их широкое применение.

Однако в условиях неуклонного роста цен на энергоносители опыт эксплуатации централизованных систем снабжения сжатым воздухом промышленных предприятий выявил следующие недостатки:

- утечки сжатого воздуха в разветвленной воздушной сети достигают 25–35 % от производительности КС в зависимости от протяженности, разветвленности и технического состояния воздушной сети [1]. Это обуславливает аналогичный в процентном выражении перерасход электроэнергии на КС;
- поддержание исправного состояния протяженной воздушной сети промышленного предприятия требует больших ежегодных затрат (на ремонт, уплотнение, гидравлические испытания, дренаж конденсата и т. д.);
- значительный годовой фонд заработной платы обслуживающего персонала КС;
- удельный расход электроэнергии на производство сжатого воздуха возрастает за счет собственных нужд КС (освещение машинного зала и бытовок, вентиляция, насосы оборотного водоснабжения).

Децентрализация систем снабжения сжатым воздухом на основе применения автоматизированных винтовых воздушных компрессоров

Совершенствование конструкций воздушных компрессоров и развитие микропроцессорной техники обеспечили полную автоматизацию и экономичность работы компрессорных установок в широком диапазоне производительности и существенно изменили

техническую и экономическую ситуации в области выработки сжатого воздуха. При этом наибольшее техническое развитие получили винтовые компрессорные установки, производимые как известными зарубежными, так и российскими производителями.

К достоинствам современных винтовых компрессоров по сравнению с другими типами компрессорных установок относятся: шкафная компоновка; малые масса и габаритные размеры; невысокие уровни вибрации и создаваемого шума; полная автоматизация; непрерывная диагностика эксплуатационных параметров; отсутствие потребности в охлаждающей воде, пульсации давления сжатого воздуха, потребности в массивном фундаменте и обеспечение возможности монтажа не только на нулевой отметке здания.

Энергетическая эффективность компрессорных установок, оснащенных электроприводом, определяется удельным расходом электрической энергии на выработку сжатого воздуха, который для современных винтовых компрессорных установок сопоставим с лучшими поршневыми компрессорами и составляет около $0,10$ (кВт·ч)/м³.

Винтовые компрессорные установки наиболее подходят для создания локальных и местных воздушных сетей на промышленном предприятии, так как они единственные обладают необходимым для таких сетей свойством – широким диапазоном плавного экономичного регулирования производительности от 40 до 100% практически без увеличения удельного расхода электрической энергии на привод [2–6]. Особенно это относится к частотному регулированию электропривода и производительности компрессорной установки, что позволяет обеспечить эффективное снабжение сжатым воздухом локальной или местной воздушной сети при произвольном включении и отключении потребителей сжатого воздуха и при минимальном резервировании по расходу воздуха.

Процесс перехода от централизованной системы снабжения отечественных промышленных предприятий и деповских площадок

сжатым воздухом к децентрализованной системе воздухообеспечения на практике затягивается на годы и происходит путем создания локальных или местных воздушных сетей для вновь устанавливаемого оборудования при сохранении длительное время существующей централизованной системы с центральной КС. Однако в таком случае при длительном процессе постепенной модернизации системы снабжения сжатым воздухом сохраняется ощутимый перерасход денежных средств на действующую КС, увеличивающий срок окупаемости капитальных вложений в новое оборудование.

Оценка потенциальной экономии при децентрализации системы снабжения сжатым воздухом на основе применения автоматизированных винтовых воздушных компрессоров

При децентрализации системы снабжения сжатым воздухом оценка годового снижения расхода электроэнергии ((кВт·ч)/год) на привод компрессоров при равной полезной выработке сжатого воздуха может быть выполнена по формуле

$$\Delta \mathcal{E}^{\text{год}} = k \left(\frac{\mathcal{E}_{\text{п.КС}}}{\mathcal{E}_{\text{в.ср}}} \right) \left(\frac{\mathcal{E}^{\text{пер}}}{\tau^{\text{пер}}} \right) \tau^{\text{год}},$$

где $k = 0,2-0,3$ – коэффициент снижения расхода сжатого воздуха за счет исключения утечек в магистральных сетях при децентрализации системы воздухообеспечения, определенный в зависимости от технического состояния воздушной сети, ее протяженности и разветвленности, по данным энергетических обследований систем централизованного воздухообеспечения промышленных и транспортных предприятий по линии международных проектов Tacis/91-E007, WW 9103/02.01/B003, ERUS 9310 Energy Centre for NW Russia, и энергоаудитов, выполненных ООО «Центр Энерго-

сбережения» (г. Санкт-Петербург); $\varepsilon_{п.КС}$ – средний по централизованной КС удельный расход электроэнергии при поршневых компрессорах, на выработку сжатого воздуха, (кВт·ч)/ нм^3 ; $\varepsilon_{в.ср}$ – средний удельный расход электроэнергии на выработку сжатого воздуха планируемых к установке локальных станций автоматизированных винтовых компрессоров, (кВт·ч)/ нм^3 ; $\mathcal{E}^{\text{пер}}$ – расход электроэнергии на производство сжатого воздуха за отчетный период (месяц, квартал, полугодие, год) по данным технического учета на предприятии, (кВт·ч)/период; $\tau^{\text{пер}}$ – продолжительность работы компрессоров КС за период, ч; $\tau^{\text{год}}$ – продолжительность работы компрессоров КС за год, ч.

Для поршневых компрессоров средний удельный расход электроэнергии на клеммах электродвигателей по результатам вышеуказанных энергетических обследований будет равен

$$\varepsilon_{п.ср} = 0,11 \text{ (кВт} \cdot \text{ч)/нм}^3.$$

При этом удельный расход электроэнергии на собственные нужды КС – на освещение, вентиляцию и насосную станцию системы оборотного водоснабжения – составит

$$\varepsilon_{сн.КС} = 0,2 \cdot \varepsilon_{п.ср} = 0,022 \text{ (кВт} \cdot \text{ч)/нм}^3.$$

Тогда средний удельный расход электроэнергии на выработку сжатого воздуха на КС при централизованной системе воздухообеспечения

$$\varepsilon_{п.КС} = 0,11 + 0,022 = 0,132 \text{ (кВт} \cdot \text{ч)/нм}^3.$$

Аналогично может быть рассчитан удельный расход электроэнергии на выработку сжатого воздуха при децентрализации воздухообеспечения на основе установки винтовых компрессоров в цехах или в непосредственной близости потребителей.

Удельный расход электроэнергии на выработку сжатого воздуха винтовыми компрессорами определяется из паспортных данных и равен в среднем

$$\varepsilon_{в} = 0,1 \text{ (кВт} \cdot \text{ч)/нм}^3.$$

Средний удельный расход электроэнергии на собственные нужды локальной станции винтовых компрессоров, в том числе на охлаждение масла, освещение и автоматизацию винтовых компрессоров, по данным заводов-изготовителей равен

$$\varepsilon_{сн.в} = 0,007 \text{ (кВт} \cdot \text{ч)/нм}^3.$$

Тогда средний удельный расход электроэнергии на выработку сжатого воздуха при планируемых к установке локальных станциях автоматизированных винтовых компрессоров

$$\begin{aligned} \varepsilon_{в.ср} &= \varepsilon_{в} + \varepsilon_{сн.в} = 0,1 + 0,007 = \\ &= 0,107 \text{ (кВт} \cdot \text{ч)/нм}^3. \end{aligned}$$

Отсюда потенциальная экономия только электроэнергии на снабжение сжатым воздухом при переходе на децентрализованную систему воздухообеспечения предприятия составляет

$$\Delta \mathcal{E}^{\text{год}} = K_{\text{мс}} \cdot \left(\frac{\mathcal{E}^{\text{пер}}}{\tau^{\text{пер}}} \right) \cdot \tau^{\text{год}},$$

где $K_{\text{мс}} = k \cdot \left(\frac{\varepsilon_{п.КС}}{\varepsilon_{в.ср}} \right)$ – коэффициент, равный 0,25–0,37, выбирается в зависимости от технического состояния магистральной воздушной сети, ее протяженности и разветвленности; меньшее значение берется для короткой и малоразветвленной сети воздухопроводов при выполнении регламентных работ по ее контролю и периодической герметизации.

Оценка годовой экономии денежных средств (руб./год) при переходе на децентрализованное воздухообеспечение предприятия сжатым воздухом рассчитывается по формуле

$$\Delta C = \Delta \mathcal{E}^{\text{год}} \cdot c_3,$$

Оценка потенциальной экономии децентрализации системы снабжения сжатым воздухом на основе применения автоматизированных воздушных винтовых компрессоров

№ п/п	Статья экономии	Потенциальная экономия, %	Причина появления экономии
1	Снижение оплаты электроэнергии, затрачиваемой на снабжение сжатым воздухом	25–37	Исключаются утечки в магистральной сети (в среднем 20 % от производительности КС) и уменьшается удельный расход электроэнергии с 0,132 (кВт·ч)/м ³ – с учетом собственных нужд КС, до 0,107 (кВт·ч)/м ³
2	Снижение оплаты за установленную мощность привода компрессоров	2–4	Те же основания, что и по п. 1, приводят к снижению суммарной мощности электропривода всех компрессорных установок
3	Экономия на обслуживании магистральной воздушной сети	0,5	Отсутствует магистральная воздушная сеть, требующая затрат на свое обслуживание
4	Экономия из-за отказа от оборотного водоснабжения для нужд охлаждения компрессоров	3–5	Отсутствуют затраты на обслуживание системы оборотного водоснабжения и затраты на водоснабжение и водоотведение
5	Экономия на фонде заработной платы обслуживающего персонала центральной компрессорной станции и сетей	4,5–5,5	Компрессорные установки и локальные сети передаются в инженерную службу цехов. Заключаются договора с производителем на обслуживание компрессорных установок
	И т о г о	30–50	

в которой c_3 – средняя, сложившаяся на рынке, цена электроэнергии, руб./кВт·ч.

Срок простой окупаемости капитальных вложений (годы) при переходе на децентрализованную систему снабжения предприятия сжатым воздухом определяется следующим образом:

$$a = \frac{C_k}{\Delta C^{\text{год}}},$$

здесь C_k – суммарные капиталовложения на модернизацию (децентрализацию) системы воздухообеспечения предприятия, руб.

Оценка потенциальной экономии децентрализации системы снабжения сжатым воздухом при использовании автоматизированных воз-

душных винтовых компрессоров была выполнена на основе данных [7–14] и представлена в таблице.

Заключение

Таким образом, эксплуатационные затраты на децентрализованную систему снабжения сжатым воздухом занимают 50–70% затрат на эксплуатацию централизованной КС с магистральной воздушной сетью. Переход на децентрализованную систему снабжения сжатым воздухом промышленных предприятий и железнодорожных депо дает значительный экономический эффект, увеличивающийся в условиях неуклонного роста цен на энергоресурсы.

Библиографический список

1. Рахмилевич З.З. Компрессорные установки / З.З. Рахмилевич. – М. : Химия, 1989. – 272 с.
2. Михайлов А.К. Компрессорные машины / А.К. Михайлов, В.П. Ворошилов. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 288 с.
3. Гладышев Н.Н. Технологические энергоносители предприятий (Воздухоснабжение промышленных предприятий) : учеб. пособие / Н.Н. Гладышев, В.В. Филатов, Т.Ю. Короткова, В.Д. Иванов. – СПб. : СПбГТУРП, 2008. – 110 с.
4. Портнов В.В. Воздухоснабжение промышленного предприятия : учеб. пособие / В.В. Портнов. – Воронеж : ВГТУ, 2007. – 228 с.
5. Черкасский В.М. Насосы, вентиляторы, компрессоры : учебник для теплоэнергетич. специальностей вузов / В.М. Черкасский. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 416 с.
6. Карабин А.И. Сжатый воздух. Выработка, потребление, пути экономии / А.И. Карабин. – М. : Машиностроение, 1964. – 343 с.
7. Ярошенко В.Н. Компрессоры и вентиляторы : лабораторный практикум / В.Н. Ярошенко. – Л. : Изд-во ЛИИЖТ, 1970. – 22 с.
8. Степанов С.И. Сотрудничество Центра Энергетики ЕС с предприятиями Санкт-Петербурга и Ленинградской области / С.И. Степанов, Н.Н. Смирнов // Энергосбережение (СПб.) : Информ. бюл. – 1998. – № 1. – 2 с.
9. Буянов А.Б. Некоторые возможности сбережения энергоресурсов / А.Б. Буянов, В.И. Крылов, С.И. Степанов, В.Н. Черных // Повышение надеж-

ности и совершенствование методов ремонта подвижного состава : сб. науч. трудов. – СПб. : ПГУПС, 2001. – 4 с.

10. Буянов А.Б. Системы производства и распределения энергоносителей промпредприятий: задание на контрольную работу с методическими указаниями для студентов специальности «Промышленная теплоэнергетика» / А.Б. Буянов. – СПб. : ПИИЖТ, 1992. – 30 с.
11. Система воздухоснабжения промышленного предприятия : методические указания к выполнению курсового проекта / сост. : В.В. Филатов, Д.В. Никольский. – СПб. : ПГУПС, 2017. – 40 с.
12. Филатов В.В. Технологические энергоносители предприятий : учеб. пособие / В.В. Филатов, А.Б. Буянов. – СПб. : ПГУПС, 2006. – 52 с.
13. Степанов С.И. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях. Ч. 1 : учеб. пособие / С.И. Степанов, А.Б. Буянов. – СПб. : ПГУПС, 2008. – 58 с.
14. Степанов С.И. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях. Ч. 2 : учеб. пособие / С.И. Степанов, А.Б. Буянов. – СПб. : ПГУПС, 2010. – 67 с.

Дата поступления: 15.07.2019

Решение о публикации: 26.07.2019

Контактная информация:

СТЕПАНОВ Сергей Иванович – ст. преподаватель; espcts@yandex.ru
МИТРОФАНОВА Ирина Владимировна – ст. преподаватель; ttu@pgups.ru

Improving energy efficiency of industrial enterprises' compressed air distribution systems

S. I. Stepanov, I. V. Mitrofanova

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

For citation: Stepanov S. I., Mitrofanova I. V. Improving energy efficiency of industrial enterprises' compressed air distribution systems. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 3, pp. 515–522. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-515-522 (In Russian)

Summary

Objective: Evaluation of effectiveness of decentralised systems of compressed air distribution on the basis of automated screw-rotor air compressors. **Methods:** Comparison of the characteristics of centralised compressed air supply systems, designed on the basis of reciprocating air compressors, with decentralised systems based on automated screw-rotor compressors, and efficiency determination of decentralisation and automation of systems of compressed air distribution. **Results:** Shortcomings in energy efficiency of centralised compressed air distribution systems are identified. Possibility of saving on operating costs by decentralisation of compressed air distribution systems with installation of automated screw-rotor compressors is investigated. The method of rapid assessment of increasing energy efficiency of decentralisation of compressed air distribution system using screw-rotor air compressors is presented. Percentage rate of reduction of operating costs in compressed air distribution systems is determined. **Practical importance:** The proposed method of assessing energy efficiency of decentralisation of compressed air distribution system using screw-rotor air compressors might be recommended for practical use.

Keywords: Screw-rotor air compressor, application efficiency, compressed air distribution system, energy saving potential in compressed air production, operating costs reduction potential.

References

1. Rakhmilevich Z. Z. *Kompresornye ustanovki [Air compressor systems]*. Moscow, Khimiia Publ., 1989, 272 p. (In Russian)
2. Mikhailov A. K. & Voroshilov V. P. *Kompresornye mashiny [Compressor machines]*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989, 288 p. (In Russian)
3. Gladyshev N. N., Filatov V. V., Korotkova T. Yu. & Ivanov V. D. *Tekhnologicheskie energonositeli predpriiati (Vozdukhosnabzhenie promyshlennykh predpriiati)*. Uchebnoe posobie [*Technological energy resources of enterprises (Compressed air supply for industrial enterprises)*]. Textbook]. Saint Petersburg, SPbGTURP [Higher School of Technology and Energy] Publ., 2008, 110 p. (In Russian)
4. Portnov V. V. *Vozdukhosnabzhenie promyshlennogo predpriiati*. Uchebnoe posobie [*Compressed air supply for an industrial enterprise. Study guide*]. Voronezh, VGTU [Voronezh State Technical University] Publ., 2007, 228 p. (In Russian)
5. Cherkasskii V. M. *Nasosy, ventilatory, kompressory*. Uchebnik dlia teploenergeticheskikh spetsial'nostei vuzov [*Pumps, fans, compressors. Textbook for university students in heat and power programmes*]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984, 416 p. (In Russian)
6. Karabin A. I. *Szhatyi vozdukh. Vyrobotka, potreblenie, puti ekonomii [Compressed air. Production, consumption, economy methods]*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1964, 343 p. (In Russian)
7. Yaroshenko V. N. *Kompresory i ventilatory. Laboratornyi praktikum [Compressors and fans. Laboratory practicum]*. Leningrad, LIIZhT [Leningrad Institute of Railway Transport] Publ., 1970, 22 p. (In Russian)
8. Stepanov S. I. & Smirnov N. N. *Sotrudnichestvo Tsentra Energetiki ES s predpriiatiami Sankt-Peterburga i Leningradskoi oblasti [EU Energy Efficiency Centre's co-operation with enterprises of Saint Petersburg and Leningrad Region]*. *Energoberezhenie (SPb). Informatsionnyi biulleten' [Energy efficiency (Saint Petersburg). Information bulletin]*, 1998, no. 1, 2 p. (In Russian)
9. Buianov A. B., Krylov V. I., Stepanov S. I. & Chernykh V. N. *Nekotorye vozmozhnosti sberezheniia energoresursov [Some possibilities for saving energy resources]*. *Povyshenie nadezhnosti i sovershenstvovanie metodov remonta podvizhnogo sostava. Sbornik nauchnykh trudov [Increasing reliability and improving methods of rolling stock repair. Coll. papers]*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2001, 4 p. (In Russian)
10. Buianov A. B. *Sistemy proizvodstva i raspredeleniia energonositelei prompredpriiati. Zadanie na kontrol' nuiu rabotu s metodicheskimi ukazaniiami dlia studentov spetsial'nosti "Promyshlennaia teploenergetika" [Energy production and distribution systems*

of industrial enterprises. Assignment for inspection test with practice advisory for students specialising in industrial thermal power engineering. Saint Petersburg, PIIZhT [Petersburg Railway Transport Engineering Institute] Publ., 1992, 30 p. (In Russian)

11. *Sistema vozdukhosnabzheniia promyshlennogo predpriiatiia: metodicheskie ukazaniia k vypolneniiu kursovogo proekta [Air distribution system of an industrial enterprise: recommended practices for implementation of course project]*. Compiled by V. V. Filatov, D. V. Nicholskii. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2017, 40 p. (In Russian)

12. Filatov V.V. & Buianov A. B. *Tekhnologicheskie energonositeli predpriatii*. Uchebnoe posobie [*Technological energy resources of enterprises. Study guide*]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2006, 52 p. (In Russian)

13. Stepanov S.I. & Buianov A. B. *Energoberezhenie v teploenergetike i teplotekhnologiiakh*. Uchebnoe

posobie [*Energy saving in heat-power engineering and heat technologies. Study guide*]. Pt 1. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2008, 58 p. (In Russian)

14. Stepanov S.I. & Buianov A. B. *Energoberezhenie v teploenergetike i teplotekhnologiiakh*. Uchebnoe posobie [*Energy saving in heat-power engineering and heat technologies. Study guide*]. Pt 2. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2010, 67 p. (In Russian)

Received: July 15, 2019

Accepted: July 26, 2019

Author's information:

Sergei I. STEPANOV – Senior Lecturer; espsts@yandex.ru

Irina V. MITROFANOVA – Senior Lecturer; ttu@pgups.ru

УДК 626.862.1

Гидравлический расчет бесполостных дрен треугольного поперечного сечения при переходном режиме

В. И. Штыков, А. Б. Пономарёв

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

Для цитирования: Штыков В. И., Пономарёв А. Б. Гидравлический расчет бесполостных дрен треугольного поперечного сечения при переходном режиме // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 3. – С. 523–532.

DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-523-532

Аннотация

Цель: Разработать метод расчета бесполостных дрен треугольного профиля, закладываемых с уклоном, в случае двухстороннего впадения в коллектор. Ранее была предложена методика гидравлического расчета бесполостных дрен прямоугольного поперечного сечения. **Методы:** Бесполостной дренаж применяется в сельском хозяйстве, в системах инженерной защиты от подтопления и загрязнения окружающей среды. Имеются предложения с целью эффективного осушения и увеличения несущей способности земляного полотна применять в дорожном строительстве дрены треугольного профиля. Путем замены треугольной формы живого сечения на эквивалентную по площади прямоугольную полученное дифференциальное уравнение сводится к решенному ранее аналогичному уравнению для прямоугольного поперечного сечения. **Результаты:** Получены расчетные зависимости для определения глубины воды в дренах и расстояния между коллекторами в случае бесполостных дрен треугольного профиля, закладываемых с уклоном, при двухстороннем впадении в коллектора. **Практическая значимость:** Данный метод расчета позволит обоснованно назначать размеры бесполостных дренажей, что приведет к рациональному использованию и экономии материала засыпки.

Ключевые слова: Бесполостная дрена, треугольное сечение, гидравлический расчет, дренаж, земляное полотно.

Введение

Исследования по фильтрации в крупнозернистых материалах как в нашей стране, так и за рубежом начались примерно в середине XX в. [1–3] и продолжаются в настоящее время.

В последние годы бесполостной дренаж применяется в сельском хозяйстве [4], в системах инженерной защиты от подтопления [5] и загрязнения окружающей среды [6–9]. Проводятся работы по поиску эффективных решений по увеличению несущей способ-

ности земляного полотна для обеспечения движения тяжеловесных составов, поэтому железнодорожники [10–13] проявляют интерес к бесполостному дренажу [14]. Так, при расположении двух бесполостных дрен прямоугольного поперечного сечения в земляном полотне его несущая способность по сравнению с типовой конструкцией увеличивается в 1,7–1,8 раза [14].

При возведении земляного полотна автомобильных и железных дорог, а также взлетно-посадочных полос аэродромов в районах с избыточным увлажнением и глубоким сезонным

промерзанием основание земляного полотна с целью увеличения его несущей способности предлагается выполнять в виде жесткой треугольной формы ядра из дренирующих материалов, например щебня [15].

Однако по состоянию на сегодняшний день получены решения только по гидравлическому расчету бесполостных дрен прямоугольного и трапецидального поперечных сечений [16, 17].

Метод исследования

Целью статьи является получение на основе аналитического метода исследований расчетных зависимостей для определения глубины воды в дренах и расстояния между коллекторами в случае бесполостных дрен треугольного профиля, закладываемых с уклоном, при двухстороннем впадении в коллектора.

При наиболее распространенных уклонах железнодорожных путей движение воды в заполнителе бесполостных дрен будет происходить при переходном режиме, при котором числа Рейнольдса в случае фильтрации, в отличие от открытых потоков, меняются в очень широких пределах.

На рис. 1 и 2 представлены поперечное сечение дрены и расчетная схема при уклонах дна $i > 0$ и $i < 0$. Запишем уравнение движения воды в дифференциальной форме для произвольного сечения 1–1 бесполостной дрены (рис. 1)

$$\frac{dh}{ds} = \pm i - \left(\frac{q \cdot s}{K_l \cdot \omega} + \frac{q \cdot s^2}{K_l \cdot \omega^2} \right) =$$

$$= \pm i - \left(\frac{q \cdot s}{K_l \cdot m \cdot h^2} + \frac{q \cdot s^2}{K_l \cdot m^2 \cdot h^4} \right), \quad (1)$$

в котором s – расстояние от начала координат до рассматриваемого живого сечения; ω – площадь живого сечения бесполостной дрены в рассматриваемом сечении ($\omega = m \cdot h^2$); h – глубина воды в рассматриваемом сечении; m – коэффициент откоса; K_p, K_l – коэффициенты фильтрации заполнителя бесполостной дрены соответственно при ламинарном и турбулентном режимах; i – уклон дна дрены (знак «+» для правой части дрены, а «-» для левой); q – удельная приточность к дрене.

Уравнение (1) не сводится ни к одному обыкновенному дифференциальному уравнению. Применим способ приведения уравнения (1) к виду, решение которого было рассмотрено ранее [8]. Но прежде всего убедимся, что предлагаемый способ решения обеспечивает довольно высокую точность. Для этого сопоставим два точных решения уравнений для треугольного и прямоугольного поперечных сечений бесполостной дрены при нулевом уклоне дна при ламинарном режиме.

В случае ламинарного режима уравнение движения воды в бесполостной дрене при нулевом уклоне дна для треугольного живого сечения имеет вид

$$\frac{dh}{ds} = - \frac{q \cdot s}{K_l \cdot \omega} = - \frac{q \cdot s}{K_l \cdot m \cdot h^2}, \quad (2)$$

где все обозначения известны.

Заменим треугольное живое сечение на эквивалентное по площади прямоугольное с

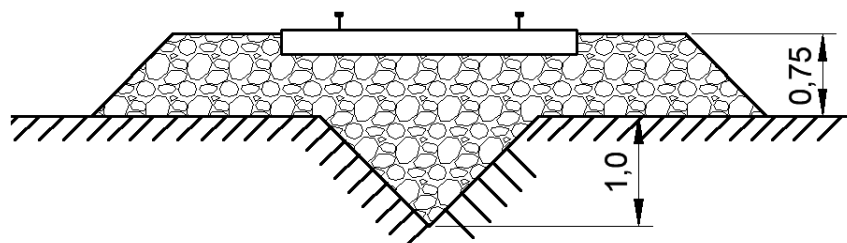


Рис. 1. Бесполостная дрена треугольного поперечного сечения

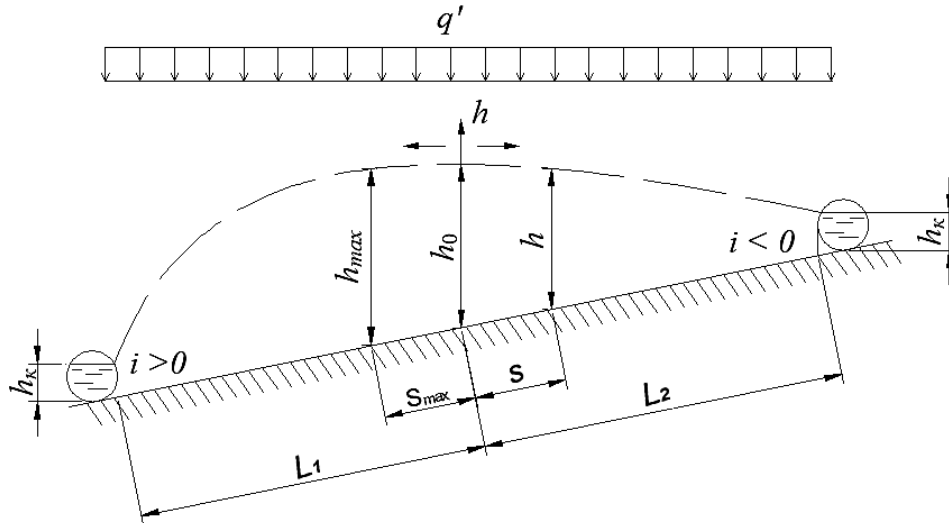


Рис. 2. Расчетная схема бесполостной дрены треугольного поперечного сечения

шириной b_e , в котором b_e назовем эквивалентной шириной прямоугольного поперечного сечения.

При этом $m \cdot h^2 = b_e \cdot h$, откуда $b_e = m \cdot h$.

Глубина фильтрационного потока вдоль бесполостной дрены, а следовательно, и величина b_e изменяются. Необходимо определить b_e для некоторой средней глубины по длине бесполостной дрены, например в долях от максимальной величины h_0 в истоке дрены. Примем, что

$$b_e = m \cdot \beta \cdot h_0. \quad (3)$$

В формуле (3) коэффициент β учитывает изменение глубины фильтрационного потока вдоль дрены.

Таким образом, уравнение (2) для бесполостной дрены эквивалентного по площади прямоугольного поперечного сечения представим следующим образом:

$$\frac{dh}{ds} = -\frac{q \cdot s}{K_l \cdot b_e \cdot h} = -\frac{q \cdot s}{K_l \cdot m \cdot \beta \cdot h_0 \cdot h}. \quad (4)$$

Проинтегрируем уравнения (2) и (4) и запишем результаты в таком виде:

$$L = \sqrt{\frac{2(h_0^3 - h_k^3) \cdot K_l \cdot m}{3q}}, \quad (5)$$

$$L = \sqrt{\frac{\beta \cdot h_0 (h_0^2 - h_k^2) \cdot K_l \cdot m}{q}}. \quad (6)$$

Расчетным случаем для любого дренажа, включая бесполостной, является отсутствие подпора в устье дрен со стороны водоприемника. В этом случае, как показывают лабораторные исследования, $h_k \approx 0,125h_0$.

Подставляя в уравнения (5) и (6) $h_k = 0,125h_0$ и приравнявая правые части, находим, что при любых одинаковых исходных данных (K_l, m, q)

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{2(h_0^3 - h_k^3)}{3(h_0^3 - h_0 \cdot h_k^2)} = \\ &= \frac{2(h_0^2 + h_0 \cdot h_k + h_k^2)}{3h_0(h_0 + h_k)} = \\ &= \frac{2[h_0^2 + 0,125h_0^2 + (0,125h_0)^2]}{3h_0(h_0 + 0,125h_0)} = 0,68. \end{aligned} \quad (7)$$

Из зависимости (7) следует, что если в устье дрены имеет место подпор, т.е. $h_k > 0,125h_0$, то коэффициент β будет иметь уже другую величину. С увеличением h_k коэффициент β будет возрастать.

При этом значении β имеем практически полное совпадение результатов расчета для точного и приближенного решений. Однако точное решение не всегда удается получить и в этом случае можно прибегнуть к предлагаемому приближенному способу.

Результаты исследований

Учитывая, что уклоны дна бесполостных дрен невелики, а протяженность самих дрен значительная, кривые свободной поверхности фильтрационных потоков вдоль дрен по форме практически не отличаются от тех, которые имеют место в безуклонных бесполостных дренах. В связи со сказанным выше и в случаях бесполостных дрен, закладываемых с уклоном при отсутствии подпора в устье, коэффициент β принимаем равным 0,68. Отсюда

$$\begin{aligned}\omega &= b_e \cdot h, \\ b_e &= m \cdot \beta \cdot h_0, \\ \beta &= 0,68,\end{aligned}$$

$$\frac{dh}{ds} = \pm i - \left(\frac{q \cdot s}{K_l \cdot b_e \cdot h} + \frac{q \cdot s^2}{K_t \cdot b_e^2 \cdot h^2} \right). \quad (8)$$

Введем обозначения:

$$\frac{q}{K_l \cdot b_e} = U_l, \quad \frac{q^2}{K_t^2 \cdot b_e^2} = U_t.$$

Для определения K_l и K_t предлагается использовать следующие зависимости [8]:

$$K_l = \frac{n \cdot g \cdot d_u^2}{8\pi^2 \cdot \nu}, \quad (9)$$

$$K_t = \frac{n \cdot C_0}{\pi^{3/2}} \sqrt{2d_u}, \quad (10)$$

здесь n – пористость заполнителя; ν – коэффициент кинематической вязкости; C_0 – коэффициент Шези; d_u – расчетное значение диаметра фильтрационного хода

$$d_u = 0,57 \sqrt[6]{\eta} \frac{n}{1-n} \cdot \frac{d_{17}}{\psi}, \quad (11)$$

где $\eta = \frac{d_{60}}{d_{10}}$ – коэффициент неоднородности материала заполнителя; d_{10} , d_{17} , d_{60} – диаметр частиц материала заполнителя, меньше которого в его составе содержится соответственно 10, 17 и 60% частиц по массе; ψ – коэффициент, учитывающий форму частиц.

Перепишем с учетом обозначений уравнение (8)

$$\frac{dh}{ds} = \pm i - \frac{U_l \cdot s}{h} - \frac{U_t \cdot s^2}{h^2}.$$

Ранее было рассмотрено решение аналогичного уравнения для бесполостной дрены прямоугольного поперечного сечения, но при одностороннем впадении в коллектора [8]. При этом для уклона дна $i > 0$ было получено следующее решение для определения h_0 :

$$\begin{aligned}h_0 &= L_1 \sqrt[3]{\frac{(t_k^3 - i \cdot t_k^2 + U_l \cdot t_k + U_t)^{(1-\Phi_1)}}{(t_k - K_1)^{(1-3\Phi_1)}}} \times \\ &\times \exp \left[-\frac{M}{\sqrt{N_1}} \left(\frac{\pi}{2} - \arctg \frac{2t_k + K_1 - i}{\sqrt{N_1}} \right) \right], \quad (12)\end{aligned}$$

в котором

$$t_k = \frac{h_k}{L_1}, \quad \Phi_1 = \frac{K_1^2}{3K_1^2 - 2K_1 \cdot i + U_l}, \quad (13)$$

$$M = (1 - \Phi_1) \frac{U_l}{K_1} + (1 - 3\Phi_1) \frac{U_t}{K_1^2}, \quad (14)$$

$$N_1 = 4(K_1^2 + U_l) - (K_1 + i)^2, \quad (15)$$

$$K_1 = \frac{i}{3} - 2r \cdot \text{sh} \left(\frac{1}{3} \text{Arsh} \frac{P}{r^3} \right), \quad (16)$$

$$r = \sqrt{\frac{U_l}{3} - \left(\frac{i}{3} \right)^2}, \quad (17)$$

$$P = -\left(\frac{i}{3}\right)^3 + \frac{i \cdot U_l}{6} + \frac{U_t}{2}. \quad (18)$$

Для расчета правой части дрены с обратным уклоном дна ($i < 0$) в формулах, содержащих уклон дна, знак перед « i » меняется на противоположный. С учетом сказанного перепишем зависимости (12)–(18):

$$h_0 = L_2 \sqrt{\frac{(t_k^3 + i \cdot t_k^2 + U_l \cdot t_k + U_t)^{(1-\Phi_1)}}{(t_k - K_1)^{(1-3\Phi_1)}}} \times \exp\left[-\frac{M}{\sqrt{N_1}} \left(\frac{\pi}{2} - \arctg \frac{2t_k + K_1 + i}{\sqrt{N_1}}\right)\right],$$

$$\text{где } t_k = \frac{h_k}{L_2}; \quad \Phi_1 = \frac{K_1^2}{3K_1^2 + 2K_1 \cdot i + U_l};$$

$$M = (1 - \Phi_1) \frac{U_l}{K_1} + (1 - 3\Phi_1) \frac{U_t}{K_1};$$

$$N_1 = 4(K_1^2 + U_l) - (K_1 - i)^2;$$

$$K_1 = -\frac{i}{3} - 2r \cdot \text{sh}\left(\frac{1}{3} \text{Arsh} \frac{P}{r^3}\right);$$

$$r = \sqrt{\frac{U_l}{3} - \left(\frac{i}{3}\right)^2};$$

$$P = -\left(-\frac{i}{3}\right)^3 - \frac{i \cdot U_l}{6} + \frac{U_t}{2}.$$

Ход расчета рассмотрим на примере.

Дано: материал заполнителя бесполостной дрены – щебень фракции 5–20 мм: $d_{17} = 1,2$ см; $\eta = 1,9$; $n = 0,48$; $\psi = 1,68$; $C_0 = 78$ см^{0,5}/с; $v = 0,0131$ см²/с; $m = 1,0$; $h_0 = 0,5$ м; $h_k = 0,06$ м; $q = 0,5 \cdot 10^{-4}$ м²/с. Нужно: определить L_1 , h_{\max} , L_2 .

1. По зависимости (11) рассчитаем величину расчетного диаметра фильтрационного хода d_u :

$$d_u = 0,57 \sqrt[6]{\eta} \cdot \frac{n}{1-n} \cdot \frac{d_{17}}{\psi} =$$

$$= 0,57 \cdot \sqrt[6]{1,9} \cdot \frac{0,48}{1-0,48} \cdot \frac{1,2}{1,68} =$$

$$= 0,42 \text{ см.}$$

2. По формулам (9) и (10) вычисляем коэффициенты фильтрации при ламинарном и турбулентном режимах:

при ламинарном режиме

$$K_l = \frac{n \cdot g \cdot d_u^2}{8\pi^2 \cdot v} =$$

$$= \frac{0,48 \cdot 9,81 \cdot 0,0042^2}{8 \cdot 3,14^2 \cdot 0,0131 \cdot 10^{-4}} =$$

$$= 0,803 \text{ м/с,}$$

при турбулентном режиме

$$K_t = \frac{n \cdot C_0}{\pi^{3/2}} \sqrt{2d_u} =$$

$$= \frac{0,48 \cdot 78}{3,14^{3/2}} \sqrt{2 \cdot 0,42} =$$

$$= 6,17 \text{ см/с, или } 0,0617 \text{ м/с,}$$

$$L_1 = h_0 \sqrt{\frac{(t_k - K_1)^{(1-3\Phi_1)}}{(t_k^3 - i \cdot t_k^2 + U_l \cdot t_k + U_t)^{(1-\Phi_1)}}} \times \exp\left[\frac{M}{\sqrt{N_1}} \left(\frac{\pi}{2} - \arctg \frac{2t_k + K_1 - i}{\sqrt{N_1}}\right)\right].$$

Так как L_1 входит в зависимость для определения t_k , то задаемся некоторым его значением: примем $L_1 = 24$ м, $h_k = 0,125h_0 = 0,06$ м. Тогда

$$t_k = \frac{0,06}{24} = 0,0025,$$

$$b_e = m \cdot \beta \cdot h_0 = 1 \cdot 0,68 \cdot 0,50 = 0,34 \text{ м,}$$

$$U_l = \frac{q}{K_l \cdot b_e} = \frac{0,5 \cdot 10^{-4}}{0,803 \cdot 0,34} = 1,831 \cdot 10^{-4},$$

$$U_t = \frac{q^2}{K_t^2 \cdot b_e^2} = \frac{0,25 \cdot 10^{-8}}{0,00381 \cdot 0,1156} = 5,676 \cdot 10^{-6},$$

$$r = \sqrt{\frac{U_l}{3} - \left(\frac{i}{3}\right)^2} = \sqrt{\frac{1,831 \cdot 10^{-4}}{3} - \left(\frac{0,003}{3}\right)^2} = 0,774 \cdot 10^{-2},$$

$$P = -\left(\frac{i}{3}\right)^3 + \frac{i \cdot U_l}{6} + \frac{U_t}{2} = -\left(\frac{0,003}{3}\right)^3 + \frac{0,003 \cdot 1,831 \cdot 10^{-4}}{6} + \frac{5,676 \cdot 10^{-6}}{2} = 2,878 \cdot 10^{-6},$$

$$K_1 = \frac{0,003}{3} - 2 \cdot 0,774 \cdot 10^{-2} \times$$

$$\times \operatorname{sh} \left[\frac{1}{3} \operatorname{Arsh} \frac{2,878 \cdot 10^{-6}}{(0,774 \cdot 10^{-2})^3} \right] = -1,56 \cdot 10^{-2},$$

$$\Phi_1 = \frac{K_1^2}{3K_1^2 - 2K_1 \cdot i + U_l} = \frac{(-1,56 \cdot 10^{-2})^2}{3(-1,56 \cdot 10^{-2})^2 + 2 \cdot 1,56 \cdot 10^{-2} \times$$

$$\times 0,003 + 1,831 \cdot 10^{-4}} = 0,242,$$

$$M = (1 - \Phi_1) \cdot \frac{U_l}{K_1} + (1 - 3\Phi_1) \cdot \frac{U_t}{K_1^2} =$$

$$= \frac{(1 - 0,242) \cdot 1,831 \cdot 10^{-4}}{-1,56 \cdot 10^{-2}} +$$

$$+ (1 - 3 \cdot 0,242) \cdot \frac{5,676 \cdot 10^{-6}}{2,434 \cdot 10^{-4}} = -0,25 \cdot 10^{-2},$$

$$N_1 = 4(K_1^2 + U_l) - (K_1 + i)^2 =$$

$$= 4(2,434 \cdot 10^{-4} + 1,831 \cdot 10^{-4}) + (-1,56 \cdot 10^{-2} + 0,3 \cdot 10^{-2})^2 = 15,47 \cdot 10^{-4},$$

$$L_1 = 0,5 \sqrt{\frac{(0,0025 - 1,56 \cdot 10^{-2})^{0,274}}{0,0025^3 - 0,3 \cdot 10^{-2} \times \left[\begin{array}{l} \times 0,0025^2 + 1,831 \cdot 10^{-4} \times \\ \times 0,0025 + 5,676 \cdot 10^{-6} \end{array} \right]^{0,758}}} \times$$

$$\times \exp \left[\begin{array}{l} -\frac{0,25 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{15,47 \cdot 10^{-4}}} \times \\ \left(\frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{-1,56 \cdot 10^{-2} - 0,3 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{15,47 \cdot 10^{-4}}} \right) \end{array} \right] =$$

$$= 24 \text{ м.}$$

Так как полученное значение L_1 совпадает с той величиной L_1 , которой мы задавались, то это и является искомым результатом.

Для определения L_2 поступим аналогичным образом. Примем, что $L_2 = 21$ м.

Величины b_e , U_p , U_t не меняются, т.е. $b_e = 0,34$ м; $U_l = 1,831 \cdot 10^{-4}$; $U_t = 5,676 \cdot 10^{-6}$. Отсюда

$$t_k = \frac{0,06}{21} = 0,0028,$$

$$r = \sqrt{\frac{U_l}{3} - \left(-\frac{i}{3}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\frac{1,831 \cdot 10^{-4}}{3} - \left(\frac{0,003}{3}\right)^2} = 0,774 \cdot 10^{-2},$$

$$P = -\left(-\frac{i}{3}\right)^3 - \frac{i \cdot U_l}{6} + \frac{U_t}{2} =$$

$$= -\left(-\frac{0,003}{3}\right)^3 - \frac{0,003 \cdot 1,831 \cdot 10^{-4}}{6} +$$

$$+ \frac{5,676 \cdot 10^{-6}}{2} = 2,747 \cdot 10^{-6},$$

$$\begin{aligned}
K_1 &= -\frac{0,003}{3} - 2 \cdot 0,774 \cdot 10^{-2} \times \\
&\times \operatorname{sh} \left[\frac{1}{3} \operatorname{Arsh} \frac{2,747 \cdot 10^{-6}}{(0,774 \cdot 10^{-2})^3} \right] = -1,529 \cdot 10^{-2}, \\
\Phi_1 &= \frac{K_1^2}{3K_1^2 + 2K_1 \cdot i + U_l} = \\
&= \frac{(-1,529 \cdot 10^{-2})^2}{3(-1,529 \cdot 10^{-2})^2 - 2 \cdot 1,529 \cdot 10^{-2} \times} \\
&\quad \times 0,003 + 1,831 \cdot 10^{-4}} \\
&= 0,295, \\
M &= (1 - \Phi_1) \cdot \frac{U_l}{K_1} + (1 - 3\Phi_1) \cdot \frac{U_l}{K_1^2} = \\
&= \frac{(1 - 0,295) \cdot 1,831 \cdot 10^{-4}}{-1,529 \cdot 10^{-2}} + \\
&+ (1 - 3 \cdot 0,295) \frac{5,676 \cdot 10^{-6}}{(-1,529 \cdot 10^{-2})^2} = \\
&= -0,564 \cdot 10^{-2}, \\
N_1 &= 4(K_1^2 + U_l) - (K_1 - i)^2 = \\
&= 4(2,338 \cdot 10^{-4} + 1,831 \cdot 10^{-4}) + \\
&+ (-1,529 \cdot 10^{-2} + 0,3 \cdot 10^{-2})^2 = \\
&= 13,341 \cdot 10^{-4}, \\
L_2 &= 0,5 \sqrt{\frac{(0,0028 - 1,529 \cdot 10^{-2})^{0,115}}{0,0028^3 - 0,003 \times} \times} \\
&\quad \times \left[\frac{0,0028^2 + 1,831 \cdot 10^{-4} \times}{0,0028 + 5,676 \cdot 10^{-6}} \right]^{0,705} \times \\
&\quad \times \exp \left[\frac{0,564 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{13,331 \cdot 10^{-4}}} \times \right. \\
&\quad \left. \times \left(\frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{2 \cdot 0,0028 -}{\sqrt{13,331 \cdot 10^{-4}}} \frac{-1,529 \cdot 10^{-2} + 0,003}{\sqrt{13,331 \cdot 10^{-4}}} \right) \right] = \\
&= 21 \text{ м},
\end{aligned}$$

$$L_1 + L_2 = 24 + 21 = 45 \text{ м.}$$

Известно, что максимальная глубина воды в бесполостной дрене устанавливается в сечении, находящемся в той половине дрены, которая располагается по уклону. При этом расстояние от точки отсчета (от «водораздела») определяется по следующим расчетным зависимостям [8]:

$$t_{\max} = \frac{U_l}{2i} \left(1 + \sqrt{1 + 4i \cdot \frac{U_l}{U_l^2}} \right), \quad (19)$$

$$\begin{aligned}
s_{\max} &= h_0 \times \\
&\times \sqrt{\frac{(t_{\max} - K_1)^{(1-3\Phi_1)}}{(t_{\max}^3 - i \cdot t_{\max}^2 + U_l \cdot t_{\max} + U_l)^{(1-\Phi_1)}}} \times \\
&\times \exp \left[\frac{M}{\sqrt{N_1}} \left(\frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{2t_{\max} + K_1 - i}{\sqrt{N_1}} \right) \right], \quad (20)
\end{aligned}$$

где $t_{\max} = \frac{h_{\max}}{s_{\max}}$; h_{\max} – максимальная глубина воды в бесполостной дрене; s_{\max} – расстояние от «водораздела» до сечения с максимальной глубиной.

Расчет, выполненный по формулам (19) и (20), дал следующие результаты: $h_{\max} = 0,51$ м; $s_{\max} = 6,1$ м.

Из приведенных выше расчетов следует, что кривая свободной поверхности фильтрационного потока по форме несущественно отличается от той, которая имеет место в безуклонной дрене. Вначале, на участке длиной $0,25L_1$, она практически не меняется, а затем медленно снижается и только в самом конце резко падает вниз, как это следует из рис. 2.

Заключение

Дифференциальное уравнение, описывающее движение воды в бесполостной дрине треугольного поперечного сечения, закладываемой с уклоном при двухстороннем впадении в коллектора, не сводится ни к одному

обыкновенному дифференциальному уравнению.

Путем замены треугольной формы живого сечения на эквивалентную по площади прямоугольную полученное дифференциальное уравнение сводится к решенному ранее аналогичному уравнению для прямоугольного поперечного сечения.

Учет влияния изменения глубины воды вдоль бесполостной дрены треугольного поперечного сечения на величину эквивалентной ширины b_e прямоугольного производится путем введения коэффициента β , величина которого определена путем сравнения точных решений для треугольного профиля бесполостной дрены и прямоугольного эквивалентной ширины b_e при равных остальных условиях.

Получены расчетные зависимости, позволяющие определить глубину воды в бесполостной дрене треугольного профиля и расстояние между коллекторами при двухстороннем впадении в них дрен, закладываемых с уклоном.

Библиографический список

1. Избаш С. В. Вопросы турбулентной фильтрации в наброске / С. В. Избаш, Н. М. Леяева // Гидротехническое строительство. – 1971. – № 5. – С. 39–41.
2. Kuwahara F. Numerical modeling of turbulent flow in porous media using a spatially periodic array / F. Kuwahara, Y. Kameyama, S. Yamashita, A. Nakayama // *Journal of Porous Media*. – 1998. – Vol. 1 (1). – P. 47–55. DOI:10.1615/JPorMedia.v1.i1.40
3. Pauthenet M. Inertial sensitivity of porous microstructures / M. Pauthenet, Y. Davit, M. Quintard, A. Bottaro // *Transport in Porous Media*. – 2018. – Vol. 125 (2). – P. 211–238.
4. Штыков В. И. Бесполостной дренаж периодического профиля / В. И. Штыков, Ю. Г. Янко // Мелиорация и водное хозяйство. – 2009. – № 4. – С. 35–37.
5. Сольский С. В. Обоснование технических решений по подавлению гидроразмыва основания при строительстве котлована хранилища нефтепродуктов / С. В. Сольский, О. Н. Новицкая, М. Г. Лопатина и др. // Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2012. – Т. 265. – С. 81–91.
6. Штыков В. И. Гидравлический расчет бесполостного дренажа при грунтовым напорном питании / В. И. Штыков, А. В. Козлова // Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2007. – Т. 247. – С. 84–90.
7. Сольский С. В. Практика рекультивации полигона промышленных токсичных отходов СПБГУПП «Полигон “Красный Бор”» / С. В. Сольский, Е. В. Герасимова, Н. В. Дубровская и др. // Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2012. – Т. 263. – С. 62–72.
8. Kaushik M. K. Performance assessment of gravel-tire chips mixes as drainage layer materials using real active MSW landfill leachate / M. K. Kaushik, A. Kumar, A. Bansal // *Geotechnical and Geological Engineering*. – 2015. – Vol. 33 (4). – P. 1081–1098.
9. Kaushik M. K. Drainage performance of different sizes tire chips used alone and mixed with natural aggregates as leachate drainage layer material / M. K. Kaushik, A. Kumar, A. Bansal // *Geotechnical and Geological Engineering*. – 2016. – Vol. 34 (1). – С. 167–191.
10. Соколовский И. К. Укрепления балластного слоя геоматериалами на участках с тяжеловесным движением поездов / И. К. Соколовский // Вестн. современных исследований. – 2019. – № 2.18 (29). – С. 69–71.
11. Скутин А. И. Повышение устойчивости земляного полотна с помощью армирования геосинтетическими материалами / А. И. Скутин, Д. А. Скутин, О. Л. Скутина, А. И. Табынщиков // Проектирование развития региональной сети железных дорог. – 2016. – № 4. – С. 351–354.
12. Brown S. F. Identifying the key parameters that influence geogrid reinforcement of railway ballast / S. F. Brown, J. Kwan, N. H. Thoma // *Geotextiles and Geomembranes*. – 2007. – Vol. 25 (6). – P. 326–35.
13. Ibrahim S. F. Reinforcement effect of geogrid in ballast and sub-ballast of the railway track / S. F. Ibrahim, A. J. Kadhim, H. B. Khalaf // *International Journal of Geomate*. – 2018. – Vol. 15 (48). – P. 22–27.
14. Blazhko L. S. Enhancement of subgrade's bearing capacity in low water permeable (clay) soils / L. S. Blazhko, V. I. Shtykov, E. V. Chernyaev // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 189. – P. 710–715.
15. Дорожная конструкция : Патент RU 2516408 ⁽¹³⁾С1 МПК E01C3/04 / П. Н. Лищук. – За-

явка 2012141805/03 от 01.10.2012 г. – Зарегистр. 20.05.2014 г. – М., 2018. – Бюл. № 14.

16. Штыков В. И. Гидравлический расчет бесполостной дрены, усиленной дренажной трубой, заложеной с уклоном / В. И. Штыков, Е. В. Булганин, Б. А. Арын // Научная жизнь. – 2017. – № 11. – С. 26–40.

17. Штыков В. И. Гидравлический расчет бесполостных дрен трапецеидального поперечного сечения, закладываемых с уклоном / В. И. Шты-

ков // Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2014. – Т. 274. – С. 14–22.

Дата поступления: 13.05.2019

Решение о публикации: 22.05.2019

Контактная информация:

ШТЫКОВ Валерий Иванович – чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор; shtykov41@mail.ru
ПОНОМАРЕВ Андрей Борисович – канд. техн. наук, доцент; pol1nom@yandex.ru

Hydraulic calculation of non-cavity triangular cross-section drains in transient regime

V. I. Shtykov, A. B. Ponomarev

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

For citation: Shtykov V. I., Ponomarev A. B. Hydraulic calculation of non-cavity triangular cross-section drains in transient regime. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 3, pp. 523–532. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-523-532 (In Russian)

Summary

Objective: Develop a method for calculation of non-cavity triangular cross-section drains set at a slope in case of two-sided inflow into collecting drain. Earlier, a method for hydraulic calculation of non-cavity rectangular cross-section drains was proposed. **Methods:** Non-cavity drainage is applied in agriculture, in engineering protection systems for flooding and environmental pollution. Proposals were made for applying triangular cross-section drains in road-building with the objective of efficient draining and increasing earth work bearing capacity. By replacing triangular shape of the flow section with a rectangular one of equal measure, the obtained differential equation can be reduced to a similar equation for rectangular cross-section which was already solved. **Results:** Calculated dependencies for determining water depth in the drains and distances between collector drains in case of non-cavity triangular cross-section drains set at a slope in case of two-sided inflow into collecting drains. **Practical importance:** The proposed calculation methods would allow justifiably set the size of non-cavity drainages leading to rational and economic use of fill material.

Keywords: Non-cavity drain, triangular cross-section, hydraulic calculation, drainage, earth work.

References

1. Izbash S. V. & Leliaeva N. M. Voprosy turbulentnoi fil'tratsii v nabroske [Problems of turbulent filtration in sketch]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydraulic engineering]*, 1971, no. 5, pp. 39–41. (In Russian)

2. Kuwahara F., Kameyama Y., Yamashita S. & Nakayama A. Numerical modeling of turbulent flow in porous media using a spatially periodic array. *Journal of Porous Media*, 1998, vol. 1 (1), pp. 47–55. DOI:10.1615/JPorMedia.v1.i1.40

3. Pauthenet M., Davit Y., Quintard M. & Bottaro A. Inertial sensitivity of porous microstructures.

Transport in Porous Media, 2018, vol. 125 (2), pp. 211–238.

4. Shtykov V.I. & Ianko Yu. G. Bespolostnoi drenazh periodicheskogo profil'ia [Non-cavity die-rolled drainage]. *Melioratsiia i vodnoe khoziaistvo [Land reclamation and water engineering]*, 2009, no. 4, pp. 35–37. (In Russian)

5. Sol'skii S. V., Novitskaia O. N., Lopatina M. G. et al. Obosnovanie tekhnicheskikh reshenii po podavleniiu gidrorazmyva osnovaniia pri stroitel'stve kotlovana khranilishcha nefteproduktov [Rationale for engineering solutions for reduction of hydraulic washing-out of the foundation during construction of an oil storage foundation ditch]. *Ivestiia VNIIG im. B. E. Vedeneeva [Proceedings of the B. E. Vedenev All-Russian Hydraulic Engineering Institute]*, 2012, vol. 265, pp. 81–91. (In Russian)

6. Shtykov V.I. & Kozlova A. V. Gidravlicheskie raschet bespolostnogo drenazha pri gruntovom napornom pitanii [Hydraulic calculation of non-cavity drainage in groundwater feed under pressure]. *Izvestiia VNIIG im. B. E. Vedeneeva [Proceedings of the B. E. Vedenev All-Russian Hydraulic Engineering Institute]*, 2007, vol. 247, pp. 84–90. (In Russian)

7. Sol'skii S. V., Gerasimova E. V., Dubrovskaya N. V. et al. Praktika rekul'tivatsii poligona promyshlennykh toksichnykh otkhodov SPBGUPP "Poligon 'Krasnyi Bor'" [The practice of reclamation of toxic industrial waste landfill of the St. Petersburg state unitary environmental-protection enterprise Krasnyi Bor Landfill]. *Izvestiia VNIIG im. B. E. Vedeneeva [Proceedings of the B. E. Vedenev All-Russian Hydraulic Engineering Institute]*, 2012, vol. 263, pp. 62–72. (In Russian)

8. Kaushik M. K., Kumar A. & Bansal A. Performance assessment of gravel-tire chips mixes as drainage layer materials using real active MSW landfill leachate. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2015, vol. 33 (4), pp. 1081–1098.

9. Kaushik M. K., Kumar A. & Bansal A. Drainage performance of different sizes tire chips used alone and mixed with natural aggregates as leachate drainage layer material. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2016, vol. 34 (1), pp. 167–191.

10. Sokolovskii I. K. Ukrepleniia ballastnogo sloia geomaterialami na uchastkakh s tyazhelovesnym dvizheniem poezdov [Stabilisation of ballast bed by geomaterial at sections with heavy-load railway traffic]. *Vestnik sovremennykh issledovaniy [Contemporary research herald]*, 2019, no. 2.18 (29), pp. 69–71. (In Russian)

11. Skutin A. I., Skutin D. A., Skutina O. L. & Tabynshchikov A. I. Povyshenie ustoychivosti zemliannogo polotna s pomoshch'iu armirovaniia geosinteticheskimi materialami [Improving stability of earth work by reinforcement with geosynthetic materials]. *Proektirovanie razvitiia regional'noi seti zheleznykh dorog [Regional railway network development design]*, 2016, no. 4, pp. 351–354. (In Russian)

12. Brown S. F., Kwan J. & Thoma N. H. Identifying the key parameters that influence geogrid reinforcement of railway ballast. *Geotextiles and Geomembranes*, 2007, vol. 25 (6), pp. 326–35.

13. Ibrahim S. F., Kadhim A. J. & Khalaf H. B. Reinforcement effect of geogrid in ballast and sub-ballast of the railway track. *International Journal of Geomate*, 2018, vol. 15 (48), pp. 22–27.

14. Blazhko L. S., Shtykov V. I. & Chernyaev E. V. Enhancement of subgrade's bearing capacity in low water permeable (clay) soils. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 189, pp. 710–715.

15. Lishchuk P. N. Dorozhnaia konstruktsiia [Road construction]. Patent RU 2516408 ⁽¹³⁾ S1 MPK E01S 3/04. Application 2012141805/03, Oct. 01, 2012, registered May 20, 2014. Moscow, 2018. Bull. no. 14. (In Russian)

16. Shtykov V. I., Bulganin E. V. & Aryn B. B. Gidravlicheskie raschet bespolostnoi dreny, usilenoii drenazhnoi truboi, zalozhennoi s uklonom [Hydraulic calculation of non-cavity drain reinforced by drain pipe set at a slope]. *Nauchnaia zhizn' [Scientific life]*, 2017, no. 11, pp. 26–40. (In Russian)

17. Shtykov V. I. Gidravlicheskie raschet bespolostnykh dren trapetseidal'nogo poperechnogo secheniia, zakladyvaemykh s uklonom [Hydraulic calculation for non-cavity trapezoid cross-section drains set at a slope]. *Izvestiia VNIIG im. B. E. Vedeneeva [Proceedings of the B. E. Vedenev All-Russian Hydraulic Engineering Institute]*, 2014, vol. 274, pp. 14–22. (In Russian)

Received: May 13, 2019

Accepted: May 22, 2019

Author's information:

Valerii I. SHTYKOV – Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, D. Sci. in Engineering, professor; shtykov41@mail.ru

Andrei B. PONOMAREV – Cand. Sci. in Engineering, Associate Professor; pol1nom@yandex.ru