

## НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ  
СООБЩЕНИЯ, том 16, выпуск 1, 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. И. Сайфутдинова

## 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

**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,  
ПГУПС, 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

**Корниенко Анатолий Адамович**, д-р техн. наук, профессор,  
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

**Сватовская Лариса Борисовна**, д-р техн. наук, профессор,  
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

**Смирнов Владимир Николаевич**, 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

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

**Подписано в печать** с оригинал-макета 20.03.2019.

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

Усл. печ. л. 20,875. Установочный тираж 300 экз.

Заказ 266. 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 1, 2019

ISSN (Print) 1815-588X

ISSN (Online) 2658-6851

### Founder and publisher

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Emperor Alexander I St. 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. Sayfutdinova

## INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

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

**Rafael Yusupov**, D.Eng., 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., 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,

**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., Assoc. Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

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

**Anatoliy Kornienko**, D.Eng., 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

**Larisa Svatovskaya**, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

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

**Klara Talantova**, D. Eng. Sci., Assoc. 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

**Published by** Petersburg State Transport University

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

Open price

© Petersburg State Transport University, 2019

## СОДЕРЖАНИЕ

### → ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

#### **О. Н. Числов, В. А. Богачев, И. Н. Егорова, Т. В. Богачев**

- Трансчерноморская высокоскоростная пассажирская магистраль  
как инновационный проект развития транспортной системы юга России 7

### → СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – ТРАНСПОРТУ

#### **Б. А. Абдуллаев**

- Влияние солнечной радиации на теплопритоки рефрижераторных вагонов и контейнеров 18

#### **А. В. Агунов, В. В. Каверин, Е. И. Макарова, И. А. Ролле**

- Разработка универсального комплекса для исследования работы подвески с активными  
элементами двухосной тележки подвижного состава 25

#### **А. Ю. Антонов**

- О внесении изменений в расчетные формулы методики оценки воздействия подвижного  
состава на путь по условию обеспечения его надежности 31

#### **Е. В. Афанасьев, Н. А. Битюцкий, Л. В. Цыганская, Е. А. Исполова, И. О. Филиппова**

- Обновление парка вагонов-хопперов для перевозки технического углерода 37

#### **И. А. Баева**

- Методика расчета системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ  
при введении устройств регулирования напряжения 51

#### **Я. С. Ватулин, Д. А. Потахов**

- Моделирование взаимодействия элементов опорного контура железнодорожного  
грузоподъемного крана с грунтовой опорной поверхностью 59

#### **И. П. Викулов, Т. М. Назирхонов**

- Сравнительный анализ технических характеристик электровозов серий "O'Z-ELR"  
и "O'zbekiston" 68

#### **А. А. Воробьев, Т. Г. Бунькова, А. А. Соболев**

- К вопросу об оптимальном соотношении твердости пары «колесо–рельс» 77

#### **В. А. Грошев**

- К вопросу моделирования технологических процессов на станциях 87

#### **В. Г. Иванов, Н. А. Черников, Н. В. Твардовская**

- Интенсивность расчетных дождей и анализ соотношения объемов дождевой  
и производственной сточной воды для железнодорожных станций Сибирского  
и Дальневосточного регионов России 95

#### **С. Л. Самошкин, А. Н. Макаров, А. А. Хоменко, П. Ю. Семенов**

- Экспериментальное исследование прочности кронштейнов крепления генератора  
к раме вагона 105

---

**Е. И. Сквородников**, **А. С. Анисимов**, **В. А. Минаков**, **И. В. Чернышков**

Аналитическая оценка экологической безопасности тепловозных дизелей 118

**М. Л. Тонкова**

Инновационные технологии коммерческого осмотра поездов и вагонов 130

**В. Н. Фоменко**, **М. А. Шварц**

Динамическое описание температурного режима ствола шахтной вентиляции метрополитена 139

→ **ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ**

**Т. Ю. Сафонова**, **А. Н. Зубков**

Особенности построения перспективы объекта на наклонной и вертикальной картинах 149

**А. Н. Елизарьев**, **Р. Г. Ахтямов**, **М. А. Киселева**, **Д. А. Тараканов**, **Дм. А. Тараканов**,  
**Д. О. Яковлев**, **П. А. Михайлов**

Развитие методических основ оценки возникновения эффекта BLEVE при авариях на объектах хранения топлив 157

## CONTENTS

### → PROBLEMATIC OF TRANSPORT SYSTEM

#### **O. N. Chislov, V. A. Bogachev, I. N. Egorova, T. V. Bogachev**

- Transchernomorsky high-speed passenger highway as an innovation project  
on the development of transport system in the south of Russia 7

### → HIGH TECHNOLOGIES FOR TRANSPORT

#### **B. A. Abdullayev**

- Solar radiation impact on heat gain of refrigerator cars and containers 18

#### **A. V. Agunov, V. V. Kaverin, E. I. Makarova, I. A. Rolle**

- Development of the universal complex for suspension operation study  
with active elements of the rolling stock bogie truck 25

#### **A. Yu. Antonov**

- On introduction of changes in calculation formulas of impact assessment method  
of the rolling stock influence on the track by the condition of its reliability 31

#### **E. V. Afanasiyev, N. A. Bityutskiy, L. V. Tsyganskaya, E. A. Ispolova, I. O. Filippova**

- Fleet of hopper cars renewal designed to transport carbon 37

#### **I. A. Baeva**

- Calculating procedure for the system of traction power supply of DC 3,0 kV in case  
of applying voltage regulating devices 51

#### **Yan S. Vatulin, D. A. Potakhov**

- Interaction modeling of the support circuit elements of the railway load-cargo crane  
with ground support surface 59

#### **I. P. Vikulov, T. M. ugly Nazikhronov**

- Performance characteristics of "O'z-elr" and "O'zbekiston" series electric locomotives:  
comparative analysis 68

#### **A. A. Vorobyev, T. G. Bunkova, A. A. Sobolev**

- On the problem of best hardness ratio in "wheel-rail" pair 77

#### **V. A. Groshev**

- On the problem of simulation of technological processes at stations 87

#### **V. G. Ivanov, N. A. Chernikov, N. V. Tvardovskaia**

- Intensity of calculation rains and the analysis of the ratio of volumes of rain and industrial  
waste water for railway stations of The Siberian and Far Eastern regions of Russia 95

#### **S. L. Samoshkin, A. N. Makarov, A. A. Khomenko, P. Yu. Semenov**

- Experimental study of strength of bracket for mounting generators on carriage frame 105

---

<b>E. I. Skovorodnikov</b> , <b>A. S. Anisimov</b> , <b>V. A. Minakov</b> , <b>I. V. Chernyshkov</b>	
Evaluation of ecological safety of diesel locomotive engines	118
<b>M. L. Tonkova</b>	
Innovative technologies for commercial inspection of trains and carriages	130
<b>V. N. Fomenko</b> , <b>M. A. Shvarts</b>	
Dynamic description of the temperature regime of the stem of mine ventilation of metropoliten	139

---

→ **GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH**

<b>T. Yu. Safonova</b> , <b>A. N. Zubkov</b>	
Specific features of building object perspective in slanted and vertical pictures	149
<b>A. N. Elizaryev</b> , <b>R. G. Ahtyamov</b> , <b>M. A. Kiseleva</b> , <b>D. A. Tarakanov</b> , <b>Dm. A. Tarakanov</b> , <b>D. O. Yakovlev</b> , <b>P. A. Mikhailov</b>	
Development of basic procedures for evaluation of occurrence of BLEVE effect in accidents at fuel storage facilities	157



УДК 656.224+06

**О. Н. Числов, В. А. Богачев, И. Н. Егорова, Т. В. Богачев**

## **ТРАНСЧЕРНОМОРСКАЯ ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ ПАССАЖИРСКАЯ МАГИСТРАЛЬ КАК ИННОВАЦИОННЫЙ ПРОЕКТ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ ЮГА РОССИИ**

Дата поступления: 24.12.2018

Решение о публикации: 29.01.2019

Исследования проведены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-20-04236офи\_м\_РЖД).

### **Аннотация**

**Цель:** Обоснование необходимости в инновационном подходе к развитию пассажирской транспортной инфраструктуры российского Причерноморья на основе высокоскоростного железнодорожного транспорта, функционирующего в рамках мультимодального проекта. Рассматривается проект российской трансчерноморской высокоскоростной пассажирской магистрали (ВСПМ) «Черноморье», которая станет основой для интеграции Черноморских побережий Кавказа и Крыма в единый экономический, социальный, историко-культурный, туристический и общеоздоровительный комплекс. **Методы:** Применяется вариационный подход к нахождению оптимальных вариантов расположения магистрали в плане трассы с учетом имеющихся особенностей рельефа местности и ставящихся при этом транспортно-логистических и общеорганизационных задач. В качестве математических моделей маршрутов расположения магистрали используются графики интерполяционных полиномов Лагранжа. **Результаты:** Разработана экономико-географическая модель с учетом региональных транспортно-логистических особенностей, в рамках которой решена оптимизационная задача, возникающая при нахождении возможных вариантов пролегания ВСПМ в данном регионе. **Практическая значимость:** Скоординированная на базе соединяющей Геленджик с Севастополем первой очереди магистрали мультимодальная система поднимет на качественно новый уровень привлекательность указанного региона для российских и иностранных инвесторов. Реализация рассматриваемого проекта приведет к созданию в стратегически важном регионе страны транспортного пространства, которое позволит ему стать курортно-оздоровительным и туристическим кластером качественно нового уровня.

**Ключевые слова:** Транспортная инфраструктура, конкурентоспособность, высокоскоростное движение, транспортная подвижность, мультимодальная система, экономико-географическая модель, вариационный подход, пакет программного обеспечения.

\***Oleg N. Chislov**, D. Eng. Sci., associate professor, head of chair, o\_chislov@mail.ru; **Viktor A. Bogachev**, Cand. Phys. and Math. Sci., associate professor, bogachev-va@yandex.ru; **Irina N. Egorova**, senior lecturer, zezeze1986@list.ru (Rostov State Transport University); **Taras V. Bogachev**, Cand. Phys. and Math. Sci., associate professor, bogachev73@yandex.ru (Rostov State University of Economics) TRANSCHERNOMORSKY HIGH-SPEED PASSENGER HIGHWAY AS AN INNOVATION

PROJECT ON THE DEVELOPMENT OF TRANSPORT SYSTEM IN THE SOUTH OF RUSSIA. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-1-7-17

The research is conducted with the active support of the Russian Foundation for Basic Research (project N 17-20-04236ofi\_m\_RZhD).

## Summary

**Objective:** To substantiate the need for an innovative approach to the development of passenger transport infrastructure of the Russian Black Sea region based on high-speed rail transport, operating as part of a multimodal project. The project of the Russian High-Speed Passenger Main Line “Chernomorье” is being considered, which will become the basis for the integration of the Black Sea coasts of the Caucasus and Crimea into a single economic, social, historical, cultural, tourist and general health complex. **Methods:** A variational approach is used to find the best options for the location of the highway in terms of the route, taking into account the existing features of the terrain as well as the transport, logistics and corporate tasks. The graphs of Lagrange interpolation polynomials are used as mathematical models of the highway location routes. **Results:** An economic-geographical model was developed taking into account regional transport and logistics features, within the framework of which the optimization problem was solved. The problem arises from finding possible options for laying a highway in this region. **Practical importance:** A multimodal system coordinated on the basis of the first line connecting Gelendzhik with Sevastopol will raise the attractiveness of this region for Russian and foreign investors to a qualitatively new level. The implementation of the project under consideration will lead to the creation of transport space in a strategically important region of the country, which will allow it to become a single resort and recreation and tourist zone of a qualitatively higher level.

**Keywords:** Transport infrastructure, competitiveness, high-speed traffic, transport mobility, multimodal system, variational approach, software package.

## Введение

Развитие пассажирской транспортной инфраструктуры российского Причерноморья имеет стратегическое значение для страны в целом. Любые перемены, происходящие в указанном регионе России, так или иначе связаны со всеми сторонами ее социально-экономической и общественно-политической жизни. Одним из проектов, который позволит в достаточно полной мере реализовать потенциал этого во многом уникального региона, может стать российская транскчерноморская высокоскоростная пассажирская магистраль (ВСПМ) «Черноморье».

В настоящей работе для указанной магистрали рассматривается ее первая очередь, которая соединит города Геленджик и Севастополь. В своей кавказской части она пройдет от Геленджика через Таманский полуостров до станции Кавказ. Затем по железнодорожному

мосту пересечет Керченский пролив и далее пройдет по Крымскому полуострову сначала от Керчи до Феодосии, а затем вдоль северной оконечности Крымских гор до Севастополя.

Следует отметить, что в контексте проекта ВСПМ «Черноморье» естественным образом затрагиваются вопросы реконструкции тупикового Новороссийского железнодорожного узла и превращения его в сквозной тип. Именно, в результате прокладки новой железнодорожной линии от разъезда 11 км (в обход станции Грушевая) до Геленджика, а также прокладки части ВСПМ от Геленджика (вдоль побережья через село Кабардинка) до станции Новороссийск будет создано своеобразное железнодорожное кольцо. На этом кольце за парком «Восточный» станции Новороссийск целесообразно построить пассажирскую станцию с парком для отстоя, ремонта и экипировки составов, которые будут курсировать по ВСПМ [1].

В перспективе в качестве второй очереди проекта «Черноморье» естественно рассмотреть линию, соединяющую новую железнодорожную станцию (хаб) Геленджик (которая будет построена в первой очереди) со станцией Туапсе (или даже со станцией Адлер). В результате транспортные перспективы развития всей курортной зоны Черноморского побережья России окажутся существенно расширенными.

Наличие «сквозной» железнодорожной магистрали инновационного типа станет основой для интеграции Черноморских побережий Кавказа и Крыма в единый экономический, социальный, историко-культурный, туристический и оздоровительный комплекс. Скоординированный на базе магистрали мультимодальный проект с промежуточными хабами, расположенными в районе Геленджика, Новороссийска, Анапы, Тамани, Керчи, Феодосии, Симферополя и Севастополя, поднимет на новый качественный уровень привлекатель-

ность указанного региона для российских и иностранных инвесторов [2].

### Мультимодальный проект «Черноморье» как генератор транспортной подвижности населения

Одной из основных задач, поставленных в государственной программе «Развитие транспортной системы РФ», является создание условий, способствующих увеличению транспортной подвижности населения (рис. 1 и 2) [3]. Для достижения этого предлагается направить усилия на инновационное развитие транспортной инфраструктуры, повышение доступности услуг транспортного комплекса для населения и конкурентоспособности транспортной системы Российской Федерации, реализацию транзитного потенциала страны, повышение безопасности и комфорта пассажирских перевозок [4–6].

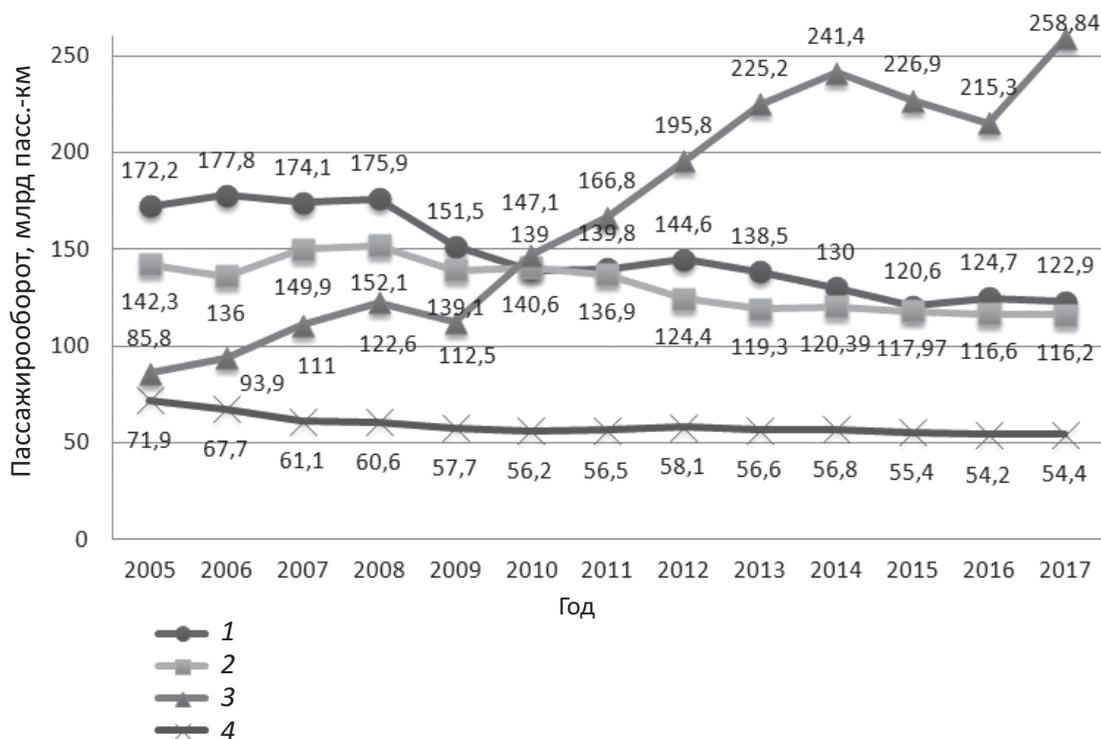


Рис. 1. Пассажи́рооборот транспорта общего пользования: транспорт: 1 – железнодорожный, 2 – автомобильный (автобусный), 3 – воздушный, 4 – городской электрический

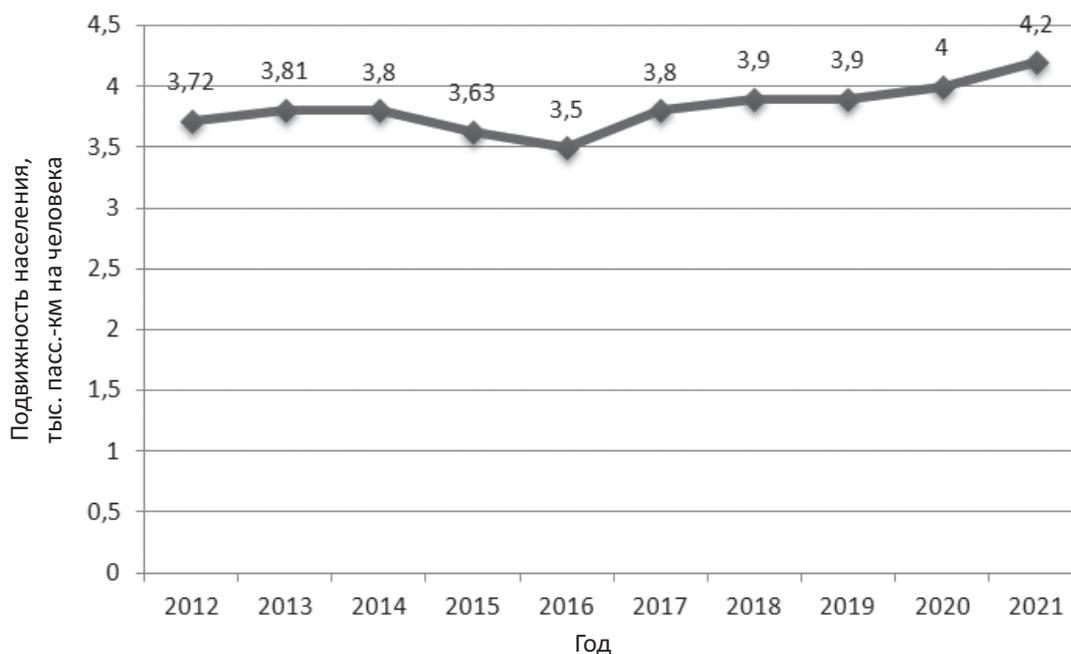


Рис. 2. Динамика транспортной подвижности населения России

Транспортная подвижность населения связана с происходящими в обществе процессами: политическими, экономическими, социальными, демографическими, культурными и способствует всестороннему развитию рыночных отношений [7]. Уровень транспортной подвижности служит чувствительным индикатором развития социума и сбалансированности указанных отношений. Из статистических данных показателя транспортной подвижности населения следует, что за последние два года обозначилась тенденция к ее возрастанию, что проявляется для поездок, осуществляемых в деловых и личных, в частности туристических, целях (рис. 2).

Имеющее место в последние годы снижение доли железнодорожного транспорта на рынке пассажирских перевозок показывает, насколько актуальным становится проведение глубоких и всесторонних исследований, использующих методы математического моделирования на новых оптимизационных критериях, позволяющих выявить потенциал этого вида транспорта для каждого из регионов страны [8, 9]. Несомненно, все сказанное относится к российскому Причерноморью.

В рамках мультимодальной системы, основу которой составит ВСПМ «Черноморье», для каждого из видов транспорта предполагается своя рыночная ниша. Она будет отводиться таким образом, чтобы взаимоотношения между этими видами осуществлялись в форме *бизнес-мутуализма* – взаимовыгодного сотрудничества, при котором каждому из них предоставляются возможности проявить свои преимущества.

Рассматриваемым проектом обеспечивается диверсифицированный пакет пассажирских и экскурсионных услуг, который с такой степенью разнообразия, качества и доступности в принципе не может быть реализован никаким другим видом транспорта в отдельности. Ввиду высокоскоростного статуса магистрали время передвижения по ней соизмеримо с предоставляемым на изучаемых расстояниях воздушным транспортом. Комфортность условий передвижения может меняться от скоростных электричек типа «Ласточка» до вагонов представительского класса.

Реализация существенной части описываемого мультимодального проекта, а именно, связь с крупными городами (например, такими

мегаполисами как Москва, Санкт-Петербург, Самара, Екатеринбург, Новосибирск) будет осуществляться авиатранспортом. Пассажиры будут прибывать в имеющиеся в настоящее время достаточно крупные аэропорты Геленджика, Анапы и Симферополя, в непосредственной близости от которых будут расположены соответствующие промежуточные хабы планируемой магистрали. Предназначением каждого из хабов является сбалансированное перераспределение всех проходящих через него пассажиропотоков [10].

Указанные авиарейсы естественно согласовать с расписанием движения поездов по магистрали, с которым, в свою очередь, должно быть согласовано время пассажирских и туристических услуг, предоставляемых другими видами транспорта. В соответствии с выбранными каждым пассажиром (или группой пассажиров) услугами реализуется комплексная программа, включающая трансфер, размещение в забронированных гостиницах и широкий спектр предусмотренных в каждом районе автобусных, автомобильных, морских, пешеходных и прочих экскурсий, а также индивидуальных поездок. При этом цена каждой из услуг, получаемых в пакете, оказывается существенно ниже предлагаемой в розницу. Заранее оказываются учтенными всевозможные потребности и запросы различных групп пассажиров, а временные затраты на все организационные вопросы минимизируются.

Предоставляемый диверсифицированный пакет гармонично сочетающихся между собой услуг содержит следующие компоненты:

1) предельно быстрое передвижение в предусмотренный маршрут пункт назначения (по времени даже более короткое, чем на самолете, ввиду более простых организационных процедур при регистрации);

2) варьируемую в широких пределах комфортность условий, в которых происходит передвижение пассажиров;

3) продуманная с познавательной, релаксационно-психологической и эстетической точек зрения «внешняя сторона» маршрута.

Социальная направленность проекта выразится в том, что посредством разветвленной мультимодальной системы будут удовлетворяться запросы российских граждан всех уровней материальной обеспеченности [11–13]. Созданные условия для реализации широкого спектра пассажирских услуг в традиционном курортном регионе существенным образом повысят транспортную подвижность населения в целом по стране. В весьма полной мере реализуется уникальность железнодорожного транспорта, состоящая в устойчивости ко всем сезонным климатическим изменениям, что является базой для развития круглогодичного ритмично функционирующего туристического и курортно-оздоровительного комплекса [14].

#### **Анализ транспортных возможностей региона**

В настоящее время Черноморские побережья Кавказа и Крыма с климатической точки зрения позиционируются как расположенные в крайней северной части субтропического пояса. Однако по многим показателям, в том числе по срокам купального сезона, рассматриваемый регион все же близок к умеренной климатической зоне. В рамках существующей транспортной сети полноценная реализация всего круглогодичного потенциала, заложенного в таком самом значительном и популярном курортно-оздоровительном и туристическом регионе страны, представляется затруднительной.

Для решения социально значимой задачи максимального использования рекреационных возможностей региона с учетом уровней материальной обеспеченности различных групп населения, а также с целью повышения конкурентоспособности железнодорожного транспорта следует организовать гибкий круглогодичный алгоритм функционирования всей имеющейся транспортной инфраструктуры. При этом, с одной стороны, должны выдерживаться пиковые летние нагрузки, а с

другой, – предусмотрены ресурсы для привлечения пассажиров в нетрадиционные для посещения морского побережья позднеосенний, зимний и ранневесенний периоды. Например, для пассажиров во «внепиковый» период могут быть применены приоритетные и даже льготные возможности пользования ВСПМ «Черноморье».

Само по себе позиционирование магистрали как высокоскоростной по статусу внешне привлекательно для потребителей транспортных услуг. Одно из принципиальных ее отличий от существующих и достаточно протяженных заключается в том, что она предназначена только для пассажирских перевозок. Таким образом, в данном случае износ пути окажется на порядок ниже, чем при совмещенном движении, что повлечет за собой существенно меньшие затраты на его текущее содержание и ремонт.

### **Вариационная методика решения оптимизационной задачи трассирования ВСПМ в среде компьютерной математики**

Целью предлагаемого проекта в составе региональной мультимодальной системы является реализация в едином транспортном пространстве географического, историко-познавательного, туристического, рекреационного и общеоздоровительного потенциалов, какими располагает указанный регион. При выборе положения участков маршрута между хабами магистрали должны быть учтены все стороны проекта: логистическая, топографическая, геологическая, гидрологическая, сейсмологическая, технико-технологическая, социально-экономическая, экологическая, эстетическая. Таким образом, описываемая в полном виде математическая модель является многофакторной.

В настоящей работе постараемся ответить на вопросы, которые естественным образом возникают на первых этапах рассмотрения проекта ВСПМ «Черноморье». Одно из принципиальных ограничений при выборе

маршрута пролегания магистрали обуславливается рельефом местности [15]. С точки зрения минимальности материальных затрат на изыскательские и строительные работы предпочтительными являются те маршруты, которые проходят по возможно более равнинной местности. В этой связи при изучении вариантов прокладки линии возникают вопросы, относящиеся к радиусам кривых пути, величина которых определяет допускаемые скорости движения поездов.

Известно, что для проектируемых ВСПМ в планах трасс используются кривые с минимальными радиусами  $R = 4000–6000$  м. После проведения соответствующих исследований для отечественных ВСПМ во ВНИИЖТ [16] было рекомендовано  $R = 7000$  м. Например, в соответствии с СТУ [17] для магистрали «Москва–Казань–Екатеринбург» при скорости 250 км/ч непогашенное поперечное ускорение на буксе не должно превышать  $0,7$  м/с<sup>2</sup>. При практикуемом максимальном возвышении наружного рельса  $h = 150$  мм и наибольшем допустимом недостатке возвышения  $\Delta h = 65$  мм для выражения связи между предельной скоростью поезда  $v_{\max}$ , км/ч, и радиусом кривой  $R$ , м, могут быть использованы зависимости вида [16]

$$v_{\max} = 4,15\sqrt{R}, \quad (1)$$

или

$$R = 0,058v_{\max}^2.$$

Из формулы (1) следует, что при радиусе кривой  $R = 7000$  м допускается скорость движения поезда  $v_{\max} = 347$  км/ч.

Разрабатываем методику, использующую вариационный подход к нахождению оптимальных вариантов расположения магистрали в плане трассы с учетом имеющихся особенностей рельефа местности и ставящихся при этом транспортно-логистических и организационных ограничений. В качестве математических моделей маршрутов расположения магистрали были применены графики

интерполяционных полиномов Лагранжа, т. е. полиномов вида

$$L_n(x) = \sum_{i=0}^n y_i \times \frac{(x-x_0)(x-x_1)\dots(x-x_{i-1})(x-x_{i+1})\dots(x-x_n)}{(x_i-x_0)(x_i-x_1)\dots(x_i-x_{i-1})(x_i-x_{i+1})\dots(x_i-x_n)} \quad (2)$$

Выбор узлов интерполирования обуславливается специфическими особенностями рельефа обследуемой местности с целью обхода проектируемой линии горных массивов, гидрологически и сейсмически сложных областей. Если использовать терминологию вариационного исчисления, то находим решение задачи о кривой с закрепленными концами в местах расположения хабов, между которыми рассматривается участок магистрали. Конкретный вид полинома Лагранжа (2), полученного для данного участка магистрали, приведен на рис. 3 в строке вывода программы.

Как пример изучим достаточно характерный с топографической точки зрения участок магистрали между хабами, расположенными в северной части Феодосии и Симферополя. Расстояние по прямой между указанными городами составляет около 100 км. После выхода магистрали из хаба, находящегося в северной окрестности Феодосии, с юга от нее останется размещенный в восточных отрогах

Крымских гор г. Старый Крым. Далее с севера от магистрали расположено в степном Крыму село Золотое Поле, а затем с юга – г. Белогорск. В этом месте с севера от магистрали открывается протяженная панорама уникального памятника природы – Белой Скалы.

Выбор феодосийского хаба позволит посетить широко известные с историко-познавательной, природной, спортивной и культурной точек зрения традиционные достопримечательности восточного Крыма – Коктебель, Карадагский заповедник, монастырь Сурб-Хач, генуэзскую крепость в Судаче, пос. Новый Свет. Также активнее станет развиваться местный экологический туризм (прогулки на лошадях в окрестностях Белогорска, посещение местных сыроварен и знаменитых крымских персиковых садов в окрестностях Золотого Поля, дегустация продуктов традиционной крымской национальной кухни).

Функциональность симферопольского хаба выражается его непосредственной близостью к аэропорту, имеющимся железнодорожным сообщением с известными оздоровительными курортами Евпаторией и Саки и, конечно, троллейбусным, автобусным и автомобильным сообщением с южным берегом Крыма. Все указанные выше обстоятельства создают условия для полноценного функционирования мультимодальной системы.

В качестве целевой функции решаемой оптимизационной задачи выступает величина радиуса кривой пути, а среди ограниче-

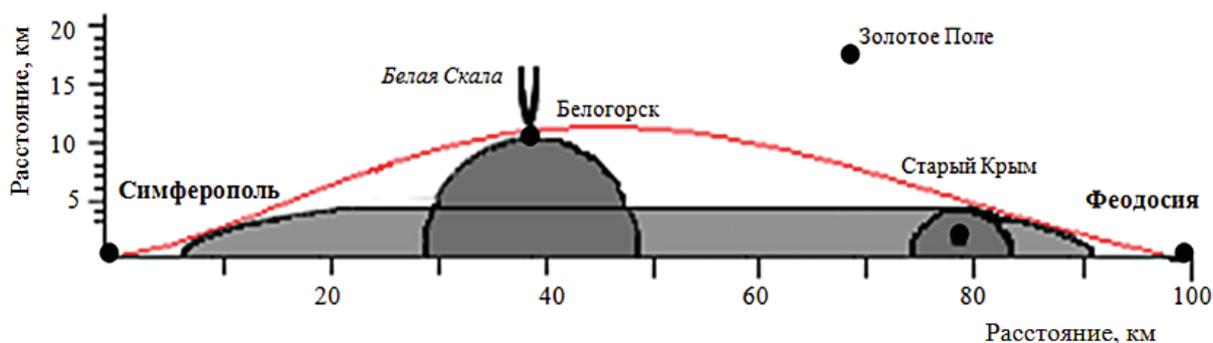


Рис. 3. Трассирование участка Феодосия–Симферополь ВСПМ «Черноморье»:

$$R := 51,29615052, \\ 0,2604167 \cdot 10^{-9} x^5 + 0,107812499 \cdot 10^{-5} x^4 - 0,000223020833 x^3 + 0,0094187500 x^2 + 0,184166667 x, \\ l := 103.1199045$$

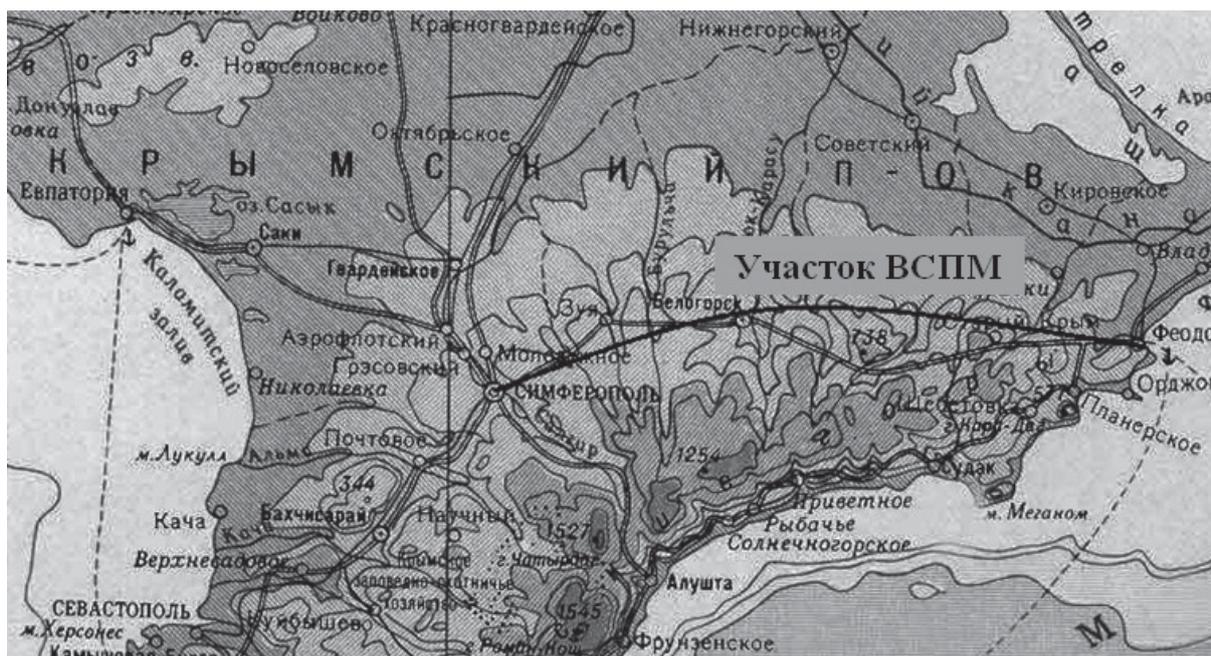


Рис. 4. Трассирование участка ВСПМ «Черноморье» на физической карте

ний имеются ввиду логистическая, топографическая, геологическая, гидрологическая, сейсмологическая, технико-технологическая, социально-экономическая, экологическая и эстетическая составляющие [18]. На рис. 3 приведено графическое изображение маршрута пролегания магистрали с учетом топографической и градостроительной составляющих между симферопольским и феодосийским хабами, найденное системой компьютерной математики Maxima (Free Ware) в процессе использования указанных выше интерполяционных методов при решении поставленной оптимизационной задачи.

Приведем численные и аналитические результаты, содержащиеся в строке вывода программы. Для найденного системой оптимального маршрута пролегания магистрали минимальный радиус кривой на рассматриваемом участке оказался равным  $R = 51\,296$  м. (Отметим, что длина участка составила около 103 км.) Получаемая по формуле (1) предельная скорость поезда оказывается соответственно равной  $v_{\max} = 937$  км/ч, что существенно выше указанной ранее допустимой скорости движения поезда  $v_{\max} = 347$  км/ч. Таким обра-

зом, на протяжении всего указанного участка ВСПМ «Черноморье» (рис. 4) ограничения по скорости движения поезда будут отсутствовать.

## Заключение

Проект ВСПМ «Черноморье» является инновационным в организационном и технико-технологическом отношении для всей Юго-Восточной Европы. Он позволит создать условия для гармоничного сочетания качественных пассажирских услуг в едином транспортном пространстве, которое недостижимо для обособленно функционирующих видов транспорта.

Магистраль станет логическим продолжением железнодорожной части Крымского моста и послужит необходимой основой для интеграции Черноморских побережий Кавказа и Крыма в единый экономический, сельскохозяйственный, социальный, историко-познавательный, культурный, туристический и общеоздоровительный комплекс.

**Библиографический список**

1. Числов О. Н. Комплексное развитие Новороссийского транспортного узла / О. Н. Числов, Н. Н. Числов, В. Н. Чернов // Труды Всерос. науч.-практич. конференции «Транспорт–2007»: в 2 ч. – Ростов н/Д.: РГУПС, 2007. – Ч. 2. – С. 57–59.
2. Гура Г. С. Причерноморье – емкий инновационный полигон развития транспортной сети России в XXI веке / Г. С. Гура, Г. И. Гура // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщения. – 2004. – № 2. – С. 64–71.
3. Государственная программа «Развитие транспортной системы». – Утв. постановлением Правительства от 20 декабря 2017 г. – № 1596.
4. Губанова А. А. Повышение конкурентоспособности предприятий транспортной отрасли на основе развития инновационной деятельности: на примере ОАО «ФПК»: дис. ... канд. экон. наук, специальность: 08.00.05 / А. А. Губанова. – М.: Рос. экон. академия им. Г. В. Плеханова, 2012. – 187 с.
5. Соколова Я. В. Совершенствование управления проектами инновационного развития в транспортной компании / Я. В. Соколова // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2014. – Вып. 2. – С. 146–152.
6. Верховых Г. В. Железнодорожные пассажирские перевозки: монография / Г. В. Верховых, А. А. Зайцев, А. Г. Котенко. – СПб.: Северо-Запад. регион. центр «РУСИЧ», «Паллада-медиа», 2012. – 520 с.
7. Макарова Е. А. Теоретические основы системы выбора факторов, влияющих на транспортную подвижность населения / Е. А. Макарова // Вестн. ВНИИЖТ. – 2006. – № 2. – С. 3–8.
8. Егорова И. Н. Сравнительный конкурентный анализ деятельности железнодорожного и других видов транспорта на рынке пассажирских перевозок / И. Н. Егорова // Развитие науки и образования в современном мире: сб. науч. трудов по материалам Междунар. науч.-практич. конференции 31 мая 2018 г. – М.: ООО «АР-Консалт», 2018. – С. 51–54.
9. Егорова И. Н. Повышение привлекательности железнодорожного транспорта на направлениях, конкурентных с автотранспортом / И. Н. Егорова, О. Н. Мелешко // Труды Ростов. гос. ун-та путей сообщения. – 2014. – № 2 (27). – С. 31–35.
10. Железнов Д. В. Определение необходимого количества транспортно-пересадочных узлов в городах России / Д. В. Железнов, С. А. Леонова // Вестн. транспорта Поволжья. – Самара: САМГУПС, 2017. – № 4 (64). – С. 53–59.
11. Лapidус Б. М. Гладкая бесшовная транспортная система – инновационная модель будущего: природа, сущность, детерминанты качества / Б. М. Лapidус, Л. В. Лapidус // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 6. Экономика. – 2017. – № 2. – С. 45–64.
12. Tschirhart F. Modeling the multimodal mass transit system and its passengers / F. Tschirhart, S. Adélé, P.-O. Bauguion, S. Tréfond // 11th World Congress on Railway Research: Research and Innovation from Today Towards 2050. 29.05–02.06.16. – Milan, Italy, 2016. – P. 3–9.
13. Фёдоров Е. А. Необходимые условия и принципы организации интермодального пассажирского сообщения с участием железнодорожного и автомобильного транспорта в республике Беларусь / Е. А. Фёдоров, М. А. Килочицкая // Вестн. Белорус. гос. ун-та транспорта. Наука и транспорт. – 2017. – № 2 (35). – С. 119–122.
14. Осипова О. Я. Транспортное обслуживание в туризме: учебник для студентов учреждений высшего профессионального образования / О. Я. Осипова. – 6-е изд., перераб. – М.: Изд. центр «Академия», 2012. – 400 с.
15. Юхина В. Ю. Проектирование трассы высокоскоростных магистралей в условиях сложного рельефа: дис. ... канд. техн. наук, специальность: 05.22.06 / В. Ю. Юхина. – М.: Моск. гос. ун-т путей сообщения (МИИТ), 2007. – 180 с.
16. Кантор И. И. Высокоскоростные железнодорожные магистрали: трасса, подвижной состав, магнитный подвес: учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта. – М.: Маршрут, 2004. – 51 с.
17. Специальные технические условия «Проектирование участка “Москва–Казань” высокоскоростной железнодорожной магистрали “Москва–Казань–Екатеринбург” со скоростями движения до 400 км/ч». – СПб.: ПГУПС, 2016. – 70 с.
18. Числов О. Н. Распределение вагонопотоков операторской компании в припортовых транспортных узлах методом экономико-географического

разграничения / О. Н. Числов, В. А. Богачев, В. М. Задорожний, Т. В. Богачев // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2016. – Т. 13, вып. 3 (48). – С. 302–313.

## References

1. Chislov O. N. Chislov N. N. & Chernov V. N. Kompleksnoye razvitiye Novorossiyskogo transportnogo uzla [Complex development of the Novorossiysk transport hub]. *Trudy Vseross. Nauch.-praktich. konferentsii "Transport–2007"* [Proceedings of the All-Russian scientific-practical conference "Transport–2007"]. Rostov-on-Don, Rostov State Transport University Publ., 2007, pt 2, pp. 57–59. (In Russian)
2. Gura G. S. & Gura G. I. Prichernomorye – yemkiy innovatsionniy polygon razvitiya transportnoy sety Rossii v 21 veke [The Black Sea Coast – a capacious innovative testing ground for the Russian transport network development in the XXI century]. *Vestnik Rostov. gos. un-ta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State University of Communications], 2004, no. 2, pp. 64–71. (In Russian)
3. Gosudarstvennaya programma "Razvitiye transportnoy sistemy" [State program "Development of the transport system"]. Utv. postanovleniyem Pravitelstva ot 20 dekabrya 2017, no. 1596 [Approved by the Government Decree dated December, 20<sup>th</sup>, 2017, no. 1596]. (In Russian)
4. Gubanova A. A. Povysheniye konkurentnosobnosti predpriyatiy transportnoy otrasly na osnove razvitiya innovatsionnoy deyatel'nosti na primere OAO "FPK" [The improvement of competitiveness of transport enterprises on the basis of innovative activity development by the example of OAO "FPK"]. Dis. Cand. Sci. in Economics, speciality: 08.00.05. Moscow, Russian Academy of Economics named after G. V. Plekhanov Publ., 2012, 187 p. (In Russian)
5. Sokolova Ya. V. Sovershenstvovaniye upravleniya proektami innovatsionnogo razvitiya v transportnoy kompanii [Management improvement of innovation development projects in a transport company]. *Izvestiya Peterb. universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. Saint Petersburg, Petersburg Transport University Publ., 2014, issue 2, pp. 146–152. (In Russian)
6. Verkhovyykh G. V., Zaitsev A. A. & Kotenko A. G. *Zheleznodorozhniye passazhirskiye perevozky* [Railway passenger transportation]. Saint Petersburg, North-Western Regional Center RUSICH, Pallada Media Publ., 2012, 520 p. (In Russian)
7. Makarova E. A. Teoreticheskiye osnovy sistemy vybora faktorov, vliyayushchikh na transportnyuyu podvizhnost naseleniya [Theoretical foundations of selecting factors influencing the transport mobility of a population]. *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of VNIIZhT], 2006, no. 2, pp. 3–8. (In Russian)
8. Egorova I. N. Sravnitel'niy konkurentniy analiz deyatel'nosti zheleznodorozhnogo i drugikh vidov transporta na rynke passazhirskikh perevozok [Comparative competitive analysis of the activities of railway and other types of transport in the passenger transportation market]. *Razvitiye nauki i obrazovaniya v sovremennoy mire* [Development of science and education in the modern world]. Sb. nauch. trudov po materialam Mezhdunar. nauch.-praktich. konferentsii 31 maya 2018 g. [A collection of scientific papers based on the materials of the International Scientific and Practical Conference on May 31, 2018]. Moscow, AR-Consult LLC Publ., 2018, pp. 51–54. (In Russian)
9. Egorova I. N. & Meleshko O. N. Povysheniye privlekatelnosti zheleznodorozhnogo transporta na napravleniyakh, konkurentnykh s avtotransportom [Improvement of railway transport attractiveness in areas competitive with motor transport]. *Trudy Rostov. gos. universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Rostov State University of Communications], 2014, no. 2 (27), pp. 31–35. (In Russian)
10. Zheleznov D. V. & Leonova S. A. Opredeleeniye neobkhodimogo kolichestva transportno-pesadochnykh uzlov v gorodakh Rossii [Determination of the required number of transport hubs in Russian cities]. *Vestnik Transporta Povolzhya* [Bulletin of Volga Transport]. Samara, SamGUPS Publ., 2017, no. 4 (64), pp. 53–59. (In Russian)
11. Lapidus B. M. & Lapidus L. V. Gladkaya besshovnaya transportnaya sistema – innovatsionnaya model budushchego: priroda, sushchnost, determinant kachestva [Smooth seamless transport system – an innovative model of the future: nature, essence and quality determinants]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 6. Ekonomika* [Bulletin of Moscow University. Series 6. Economy], 2017, no. 2, pp. 45–64. (In Russian)

12. Tschirhart F., Adélé S., Bauguion P.-O. & Tréfond S. Modeling the multimodal mass transit system and its passengers. *11th World Congress on Railway Towards 2050*, 29.05–02.06.2016. Milan, Italy, 2016, pp. 3–9.
13. Fedorov E. A. & Kiloichitskaya M. A. Neobkhodimiye usloviya i printsipy organizatsii intermodalnogo passazhirskogo soobshcheniya s uchastiyem zheleznodorozhnogo i avtomobilnogo transporta v respublike Belarus [Necessary conditions and principles for intermodal passenger traffic organization involving railway and road transport in the Republic of Belarus]. *Vestnik Belorus. gos. universiteta transporta. Nauka i transport* [Bulletin of the Belarusian State University of Transport. Science and Transport], 2017, no. 2 (35), pp. 119–122. (In Russian)
14. Osipova O. Ya. *Transportnoye obsluzhivaniye v turizme* [Transport service in tourism]. Uchebnik [College textbook]. 6th ed., ext. and rev. Moscow, Akademiya Publ., 2012, 400 p. (In Russian)
15. Yukhina V. Yu. *Proektirovaniye trassy vysokoskorostnykh magistralei v usloviyakh slozhnogo relyefa* [The route design of high-speed highways under conditions of rugged topography]. Dis. Cand. Eng. Sci., speciality: 05.22.06. Moscow, Moscow State University of Transport (MIIT) Publ., 2007, 180 p. (In Russian)
16. Kantor I. I. *Vysokoskorostniye zheleznodorozhniye magistraly: trassa, podvizhnoy sostav, magnitniy podves* [High-speed railways: highway, rolling stock, magnetic suspension]. Ucheb. posobiye dlya vuzov zh.-d. transporta [A manual for transport universities]. Moscow, Marshrut Publ., 2004, 51 p. (In Russian)
17. *Spetsialniye tekhnicheskiye usloviya "Proektirovaniye uchastka "Moskva–Kazan" vysokoskorostnoy zheleznodorozhnoy magistraly "Moskva–Kazan–Yekaterinburg" so skorostyamy dvizheniya do 400 km/ch* [Special technical regulations "Designing the Moscow–Kazan section of the high-speed Moscow–Kazan–Yekaterinburg railway with speeds up to 400 km/h"]. Saint Petersburg, Petersburg Transport University Publ., 2016, 70 p. (In Russian)
18. Chislov O. N., Bogachev V. A., Zadorozhny V. M. & Bogachev T. V. Raspredeleniye vagonopritokov operatorskoy kompanii v priportovykh transortnykh uzlakh metodom ekonomiko-geograficheskogo razgranicheniya [Distribution of wagon flows of the operator company in the port transport hubs by the method of economic and geographical differentiation]. *Izvestiya Peterb. gos. universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg State Transport University]. Saint Petersburg, Petersburg Transport University Publ., 2016, vol. 13, issue 3 (48), pp. 302–313. (In Russian)

\*ЧИСЛОВ Олег Николаевич – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, o\_chislov@mail.ru; БОГАЧЕВ Виктор Алексеевич – канд. физ.-мат. наук, доцент, bogachev-va@yandex.ru; ЕГОРОВА Ирина Николаевна – старший преподаватель, zezeze1986@list.ru (Ростовский государственный университет путей сообщения); БОГАЧЕВ Тарас Викторович – канд. физ.-мат. наук, доцент, bogachev73@yandex.ru (Ростовский государственный экономический университет).



УДК 621.869.88-71

**Б. А. Абдуллаев**

## **ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ НА ТЕПЛОПРИТОКИ РЕФРИЖЕРАТОРНЫХ ВАГОНОВ И КОНТЕЙНЕРОВ**

Дата поступления: 05.10.2018

Решение о публикации: 23.01.2019

### **Аннотация**

**Цель:** Оценка воздействия солнечной радиации на теплопритоки через ограждения кузовов рефрижераторных вагонов и контейнеров в период солнечной активности в климатических условиях Республики Узбекистан в летние месяцы. **Методы:** Производились аналитические расчеты величины солнечной радиации в условиях Узбекистана по формуле Кастрова–Савинова с учетом солнечной постоянной, интенсивности солнечной радиации на поверхность, перпендикулярную направлению лучей, высоты Солнца над горизонтом (измеряется только в градусах) и коэффициента прозрачности атмосферы. При движении вагона действию солнечной радиации подвергаются крыша и боковая стена, а контейнера – крыша, боковая и частично торцовая стены. Теплоприток от солнечной радиации учитывается введением условного лучистого коэффициента теплоотдачи или условной температуры наружного воздуха, отличающейся от истинной, на некоторую величину, показывающую долю в общем теплопритоке лучистой энергии. Принимая во внимание постоянное изменение солнечной радиации в течение светового дня и изменение нахождения вагона на стоянке либо при движении, вводится условная температура наружного воздуха. Наблюдения за положением Солнца и замеры температуры производились в конце июня в районе Ташкента, измерялось изменение солнечной радиации в течение светового дня. **Результаты:** Определено влияние солнечной радиации на наружную температуру 40-футового контейнера 1А, окрашенного в белый цвет, показана целесообразность окраски кузовов рефрижераторных вагонов, особенно крыши и боковых стен, в белый или бледно-желтый цвет для лучшего отражения солнечных лучей. **Практическая значимость:** Учет влияния солнечной радиации при расчетах теплового баланса рефрижераторных вагонов позволит повысить сохранность перевозимых грузов.

**Ключевые слова:** Скоропортящиеся грузы, контейнер, рефрижераторный вагон, рефрижераторный контейнер, теплоприток, интенсивность, солнечная радиация.

**Bakhrom A. Abdullayev**, postgraduate student, baxrom86@yandex.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) SOLAR RADIATION IMPACT ON HEAT GAIN OF REFRIGERATOR CARS AND CONTAINERS. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-1-18-24

### **Summary**

**Objective:** To evaluate the impact of solar radiation on heat gain through the guards of refrigerator car bodies and containers in the period of solar activity in climatic conditions of the Republic of Uzbekistan in summer months. **Methods:** Analytical calculations of the quantity of solar radiation in climatic conditions of Uzbekistan were carried out by Kastrov–Savinov formula taking into account the solar

constant, solar intensity at the surface, orthogonal to the direction of beams, Sun angle, which is measured in degrees only as well as the transmission coefficient. The roof and side wall of a car is exposed to solar radiation during its operation, as well as the roof, side and partially end walls of the container. Heat gain from solar radiation is taken into account by introducing a conventional radiate heat-transfer coefficient or conventional temperature of outer air, which differs from true by some value, indicating a part in general radiation heat gain. Outer air conventional temperature is introduced, by taking into account constant change of solar radiation during the daylight hours and change in location of the rail car while standing or in motion. Surveillance over the Sun position and temperature calculations were carried out in the end of June in the area of Tashkent. Solar radiation variation was measured during the daylight hours. **Results:** The impact of solar radiation on outdoor temperature of 40foot 1A container, painted white, was determined. Suitability of coloring refrigerator cars was shown, especially the roof and side walls, in white or pale yellow for better reflection of solar beams. **Practical importance:** Taking into account the impact of solar radiation when making calculations of heat balance of refrigerator cars will make it possible to improve security of transported goods.

**Keywords:** Perishable loads, container, refrigerator car, refrigerator container, heat gain, intensity, solar radiation.

## Введение

При перевозке скоропортящихся грузов (СПГ) рефрижераторный вагон или контейнер подвергается воздействию солнечной радиации, что приводит к дополнительным теплопритокам внутрь грузового помещения [1, 2]. Эта проблема особенно актуальна для Узбекистана, так как его территория находится в зоне высокого стояния Солнца. В июне-июле высота Солнца над горизонтом доходит до 71–72°, продолжительность дня составляет 15 ч. Температура воздуха летом достигает днем 40–42 °С, а ночью – 25–30 °С. Дождливых дней в июне-августе практически не бывает. Радиационный баланс в год составляет 60 ккал/см<sup>2</sup>. Именно на летние месяцы приходится пик созревания фруктов и овощей, который длится вплоть до октября. Соответственно пик перевозок СПГ также приходится на эти месяцы. В районах Казахстана, по которым пролегает железная дорога, климат также достаточно жаркий [3]. До районов России вагон в составе грузового поезда может находиться 2,5–3,5 суток, поэтому влияние солнечной радиации на вагон достаточно сильное. Однако при расчетах теплового баланса рефрижераторных вагонов учет влияния солнечной радиации производится недостаточно полно [4].

## Расчет воздействия солнечной радиации на кузов вагонов

Воздействие солнечной радиации выражается в виде суммы прямого облучения и облучения окружающей атмосферой, которая рассеивает солнечные лучи [5].

Интенсивность солнечной радиации зависит от положения Солнца над горизонтом и прозрачности воздуха. В течение дня ее величина изменяется от минимальной (утром) до максимальной (днем).

При определении солнечной радиации для условий Узбекистана будем использовать формулу Кастрова–Савинова [6]

$$I = 1360 \cdot \frac{p \sin h}{1 - p(1 - \sin h)}, \quad (1)$$

в которой 1360 – солнечная постоянная, Вт/м<sup>2</sup>;  $I$  – интенсивность солнечной радиации на поверхность, перпендикулярную направлению лучей, Вт/м<sup>2</sup>;  $p$  – коэффициент прозрачности атмосферы ( $p = 0,7-0,8$ );  $h$  – высота Солнца над горизонтом, град:

$$h = \arcsin(\sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \gamma),$$

где  $\varphi$  – географическая широта, град;  $\delta$  – склонение Солнца, град;  $\gamma$  – часовой угол, град

( $\gamma = 15 \tau_1$ );  $\tau_1$  – истинное местное время, отсчитанное от полудня, ч.

При движении вагона в составе поезда солнечному облучению подвергаются в основном крыша и боковая стена, а если это контейнеры на платформе, то частично торцевая стена.

Крыша вагона понимается как горизонтальная поверхность, тогда интенсивность на нее излучения будет равна

$$I_{кр} = I \sin h,$$

боковая стена – как вертикальная поверхность, тогда интенсивность излучения на нее определяется по формуле

$$I_{б.ст} = I \cos h \cdot \sin(\alpha_c - \nu_c),$$

где  $\alpha_c$  – азимут Солнца;  $\nu_c$  – угол (град), определяющий положение вертикальной стены вагона относительно меридиана:

$$\alpha_c = \arcsin\left(\frac{\cos \delta \sin \gamma}{\cos h}\right).$$

Практика показывает, что интенсивность облучения атмосферы (рассеивающей радиации) незначительна и составляет 7–10% от прямой.

Результаты расчетов солнечной радиации в зависимости от высоты Солнца  $h$  приведены в таблице.

Выражение для горизонтальной поверхности (крыши) можно записать следующим образом:

$$I_{пр} = 71 - 56e^{-0,026h},$$

для вертикальной поверхности (стены) – в виде

$$I_{пв} \approx 0,5I_{пр}.$$

Тогда полную интенсивность солнечной радиации рассчитывают по формулам на крышу:

$$I_{кр} = 71 + I \sin h - 56 \cdot e^{-0,026h},$$

на боковую стену вагона:

$$I_{ст} = 35 + I \cos h \cdot \sin[\alpha_c - \gamma_c] - 28 \cdot e^{-0,026h}.$$

Теплоприток от солнечной радиации можно учитывать введением условного лучистого коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{л}$  или условной температуры наружного воздуха, отличающейся от истинной, на некоторую величину, показывающую долю в общем теплопритоке лучистой энергии [7]. Действие солнечной радиации постоянно меняется в течение светового дня или от состояния вагона, который может находиться либо на стоянке, либо в движении. С утра радиация небольшая и действует в основном на боковую стену, днем с увеличением высоты Солнца над горизонтом она возрастает и действует и на боковую стену, и на крышу вагона.

### Расчеты воздействия солнечной радиации

Измерения и расчеты воздействия солнечной радиации на поверхность вагонов и контейнеров показали, что интенсивность прямой солнечной радиации меняется в течение светового дня. На рис. 1 показано изменение интенсивности солнечной радиации и температуры наружного воздуха по данным приведенной таблицы.

Наблюдения проводились 27–29 июня 2018 г. в районе Ташкента, который расположен на широте  $32^{\circ}30'$ . Наибольшие значения интенсивности радиации достигаются в полдень, когда Солнце находится на высоте  $71^{\circ}$ . Интенсивность солнечной радиации с утра (7 ч) растет и достигает в полдень  $1005 \text{ Вт/м}^2$ . Казалось бы, что температура воздуха должна возрастать с увеличением высоты Солнца. Но наивысшая температура воздуха наблюдается с 13 до 15 ч. Очевидно, это связано с тем, что поверхность земли прогревается с запаздыванием на 1,5–2 ч после полудня и отдает свое тепло в атмосферу.

## Результаты расчетов солнечной радиации

$h$ , град	$\sin h$	$I = 1360 \cdot \frac{\rho \sin h}{1 - \rho(1 - \sin h)}$ , Вт/м <sup>2</sup>	$I_{кр} = I \sin h$ , Вт/м <sup>2</sup>	$I_{бк} = I - I_{кр}$ , Вт/м <sup>2</sup>
10	0,173	462	79,92	382,08
20	0,342	688	235,2	452,8
30	0,5	816	408	408
40	0,643	895	575	320
50	0,766	944	723	221
60	0,866	981	849	132
70	0,939	1003	947	61
71	0,945	1005	949	56

Примечание.  $I_{бк}$  – интенсивность излучения Солнца.

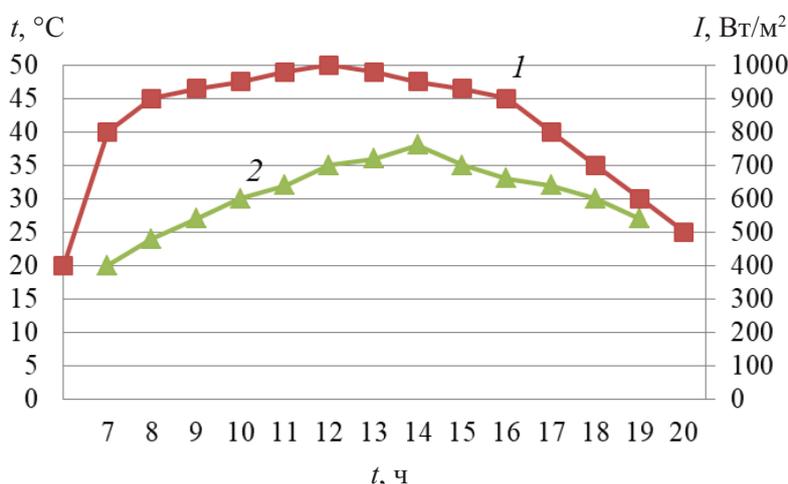


Рис. 1. Изменения прямой солнечной радиации ( $I$ ) и температуры воздуха ( $t$ ) в течение дня (27 июня 2018 г.)

На рис. 2 показана зависимость интенсивности солнечной радиации от времени в течение дня. Интенсивность радиации составляет 1005 Вт/м<sup>2</sup> в 12 ч  $\pm$  30 мин. Расчеты производились по формуле (1).

Максимальная радиация (рис. 2) приходится на крышу и минимальная на боковую стену, когда Солнце находится в наивысшей точке горизонта, т. е. в полдень. Температура наружного воздуха изменяется в течение дня – с утра от 20 до 40–42 °C в 15 ч и к вечеру падает до 25–30 °C. Особенно большее влияние солнечной радиации приходится на крышу. Исходя

из этого, можно сказать, что при проектировании ограждения крыши данную особенность необходимо учитывать. Такое состояние непременно сказывается на температурном режиме внутри кузова [8]. К вечеру величина радиации снижается с уменьшением высоты Солнца и теплового воздействия.

Введем условную температуру наружного воздуха. Тогда общий часовой теплоприток воздуха в вагон запишем так:

$$\alpha_n (t_n - t_{ст})F + \rho(I_{кр}F_{кр} + I_{ст}F_{ст}) = \alpha_n (t_{н\bar{y}} - t_{ст})F, \quad (2)$$

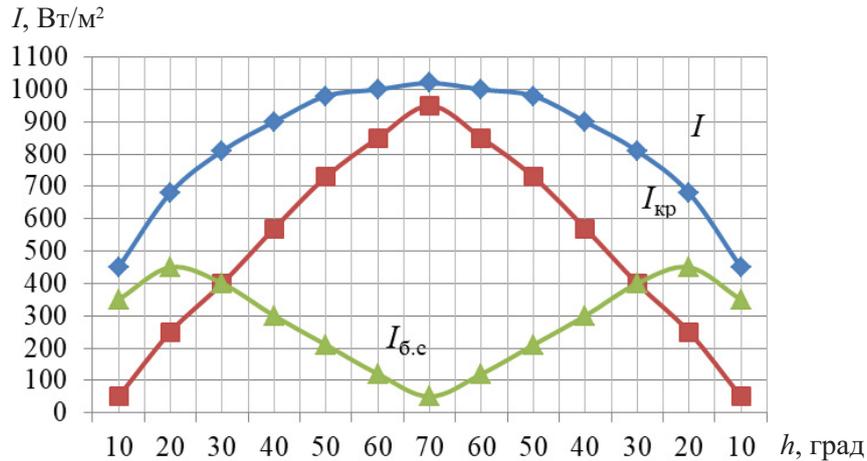


Рис. 2. Изменение солнечной радиации в зависимости от высоты Солнца:  
 $I$  – изменение прямой солнечной радиации на поверхность, перпендикулярную направлению лучей Солнца;  $I_{кр}$  – действие солнечной радиации на крышу вагона;  $I_{б.с}$  – действие солнечной радиации на боковую стену вагона

здесь  $\alpha_n$  – средний коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности вагона;  $t_{ст}$  – средняя температура на поверхности ограждения;  $t_n$  – температура воздуха снаружи вагона;  $\rho$  – коэффициент поглощения солнечных лучей;  $F$  – полная площадь кузова;  $F_{кр}$ ,  $F_{б.с}$  – площадь крыши и боковой стены кузова соответственно.

Из уравнения (2) получаем, что

$$\Delta t_{рад} = \frac{\rho}{\alpha_n} (I_{кр} \cdot \bar{F}_{кр} + I_{б.с} \bar{F}_{б.с}), \quad (3)$$

где  $\Delta t_{рад} = t_{ну} - t_n$  – условное повышение наружной температуры, эквивалентное тепловому воздействию солнечной радиации;  $\bar{F}_{кр}$  и  $\bar{F}_{б.с}$  – относительные доли площадей поверхности крыши и боковой стены от общей площади кузова.

### Влияние солнечной радиации на изменение наружной температуры кузова вагонов

Влияние солнечной радиации на наружную температуру кузова рефрижераторного вагона или контейнера рассмотрим на примере расчета 40-футового контейнера размерами 12 192×2438×2895 мм.

Для определения условного повышения наружной температуры  $\Delta t_{рад}$  по формуле (3) для контейнера, окрашенного в белый цвет, примем следующие исходные данные [9, 10]:  $\rho = 0,3$  для нового контейнера,  $\rho = 0,75$  после работы контейнера в течение 5–6 лет.

Тогда

$$\bar{F}_{кр} = \frac{F_{кр}}{F} = \frac{29,72}{143,53} = 0,20,$$

$$\bar{F}_{б.с} = \frac{F_{б.с}}{F} = \frac{35,29}{143,53} = 0,24.$$

В результате получим, что в районе Ташкента среднее значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha_n = 18$  Вт/м²,  $I_{кр} = 723$  Вт/м² по расчетным данным,  $I_{б.с} = 221$  Вт/м² при  $h_c = 50^\circ$ .

Для нового контейнера, окрашенного в белый цвет, имеем

$$\Delta t_{рад} = \frac{0,3}{18} \cdot (723 \cdot 0,2 + 221 \cdot 0,24) = 3,2 \text{ } ^\circ\text{C},$$

для проработавшего 6 лет контейнера

$$\Delta t_{рад} = \frac{0,75}{18} \cdot (723 \cdot 0,2 + 221 \cdot 0,24) = 8,23 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Изменение температуры на поверхности кузова контейнера в зависимости от состояния окрашенной поверхности составляет 5,03 °С.

Расчеты показали, что условное повышение температуры  $\Delta t_{\text{рад}}$  кузова свежеокрашенных рефрижераторных вагонов или контейнеров примерно в 2,5 раза меньше, чем вагона перед ремонтом, т. е. за несколько лет эксплуатации поверхность кузова темнеет, загрязняется, особенно крыша.

## Заключение

В настоящей работе установлено, что солнечная радиация оказывает большое влияние на температурный режим в кузове, и ее необходимо учитывать при расчете ограждений рефрижераторных вагонов и контейнеров.

Кузова рефрижераторных вагонов, особенно крышу и боковые стены, рекомендуется окрашивать в белый или бледно-желтый цвет для лучшего отражения солнечных лучей.

## Библиографический список

1. Правила перевозок железнодорожным транспортом скоропортящихся грузов. – Приказ от 18.06.2003 г. № 37. – URL : <http://doc.rzd.ru/doc/public/ru/?N44Ц> (дата обращения : 01.08.2018).
2. Ефимов В. В. Условия подготовки и перевозки скоропортящихся грузов : учеб. пособие / В. В. Ефимов. – СПб. : ПГУПС, 2003. – 124 с.
3. Панферов В. Н. Справочник-пособие по перевозке скоропортящихся грузов / В. Н. Панферов ; под ред. В. Н. Панферова. – М. : РОО «Техинформ», 2007. – 308 с.
4. Чурков Н. А. Холодильные перевозки и содержание изотермического подвижного состава / Н. А. Чурков. – М. : Желдориздат, 2006. – 310 с.
5. Китаев Б. Н. Тепловое воздействие солнечной радиации на вагоны / Б. Н. Китаев. – М. : Трансжелдориздат, 1962. – 32 с.
6. Бартош Е. Т. Энергетика изотермического подвижного состава / Е. Т. Бартош. – М. : Транспорт, 1976. – 304 с.

7. Лобасова М. С. Тепломассообмен : курс лекций / М. С. Лобасова, К. А. Финников, Т. П. Милодова и др. – Красноярск : ИПК СФУ, 2009. – 295 с.

8. Алямовский И. Г. К расчету физиологического тепла, выделяемого при охлаждении плодов и овощей / И. Г. Алямовский // Холодильная техника. – 1969. – № 8. – С. 22–23.

9. Корнилов Э. В. Рефрижераторный контейнер : учеб. пособие / Э. В. Корнилов, П. В. Бойко, В. Н. Белый, Э. И. Голофастов. – Л. : Морской транспорт, 2008. – 152 с.

10. Ефимов В. В. Теплотехнический расчет рефрижераторных транспортных модулей : Методические указания / В. В. Ефимов. – СПб. : ПГУПС, 2003. – 64 с.

## References

1. Pravila perevozok zheleznodorozhnym transportom skoroportyashchikhsya gruzov [Railroad transportation rules of perishable loads]. Regulation dated 18.06.2003 no. 37. URL: <http://doc.rzd.ru/doc/public/ru/?N44Ц> (accessed: 01.08.2018). (In Russian)
2. Efimov V.V. Usloviya podgotovki i perevozky skoroportyashchikhsya gruzov [Arrangement and transportation conditions of perishable loads]. Uchebnoye posobiye [Tutorial]. Saint Petersburg, Petersburg State Transport University Publ., 2003, 124 p. (In Russian)
3. Panferov V.N. *Spravochnik-posobiye po perevozke skoroportyashchikhsya gruzov* [A reference book on perishable traffic]. Ed. by V.N. Panferov. Moscow, ROO "Tekhinform" Publ., 2007, 308 p. (In Russian)
4. Churkov N.A. *Kholodilniye perevozky i sodержaniye izotermicheskogo podvizhnogo sostava* [Refrigerated hauling and maintenance of refrigerated rolling stock maintenance]. Moscow, Zheldorizdat Publ., 2006, 310 p. (In Russian)
5. Kitayev B.N. *Teplovoye vozdeistviye solnechnoy radiatsii na vagoni* [Thermal effect of solar radiation on railroad cars]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1962, 32 p. (In Russian)
6. Bartosh E.T. *Energetika izotermicheskogo podvizhnogo sostava* [The refrigerated rolling stock: energy profile]. Moscow, Transport Publ., 1976, 304 p. (In Russian)

7. Lobasova M. S., Finnikov K. A., Milovidova K. A. et al. *Teplomassoobmen [Heat and mass exchange]*. Course of lectures. Krasnoyarsk, IPK SFU (Publishing and Printing Complex Siberian Federal University) Publ., 2009, 295 p. (In Russian)
8. Alyamovskiy I. G. K raschetu fiziologicheskogo tepla, vydelyayemogo pry okhlazhdenii plodov i ovoshchey [On calculations of physiological heat evolved by fruit and vegetables under cooling]. *Kholodilnaya tekhnika [Refrigeration engineering]*, 1969, no. 8, pp. 22–23. (In Russian)
9. Kornilov E. V., Boiko P. V., Beliy V. N. & Golofastov E. I. *Refrizheratorniy konteyner [Refrigerator container]*. Uchebnoye posobie [Tutorial]. Leningrad, Morskoy transport [Naval operations] Publ., 2008, 152 p. (In Russian)
10. Efimov V. V. *Teplotekhnicheskiiy raschet refrizheratornykh transportnykh moduley [Heat engineering calculations for refrigerated transport modules]*. Metodicheskie ukazaniya [Guidelines]. Saint Petersburg, Petersburg State Transport University Publ., 2003, 64 p. (In Russian)

АБДУЛЛАЕВ Бахром Актамович – аспирант, [baхrom86@yandex.ru](mailto:baхrom86@yandex.ru) (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 629.4.027.3

**А. В. Агунов, В. В. Каверин, Е. И. Макарова, И. А. Ролле****РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ПОДВЕСКИ С АКТИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ДВУХОСНОЙ ТЕЛЕЖКИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

Дата поступления: 21.11.2018

Решение о публикации: 15.01.2019

**Аннотация**

**Цель:** Разработка проекта макета двухосной ходовой тележки подвижного состава для проведения испытаний, настройки и отработки алгоритмов управления подвеской на участке пути с заданным рельефом, профилем и дефектами. Макет при этом должен быть компактным и позволять выполнять быструю настройку большого числа параметров рессорного подвешивания. Кроме того, необходимо разработать проект пути и алгоритм проведения испытаний, в связи с чем для достижения поставленной цели следует спроектировать такие основные узлы как обладающий достаточным быстродействием актуатор, регулируемый гидравлический гаситель колебаний и рама тележки. **Методы:** При проектировании использован аналитический метод. **Результаты:** Представлен макет двухосной тележки, включающий в себя систему управления, раму тележки, колесные пары, активные элементы подвески амортизаторы, систему привода, а также путь. Предложен алгоритм проведения испытаний. Проанализированы преимущества и недостатки применения данного макета в сравнении с катковым стендом. **Практическая значимость:** Описанная конструкция позволяет проводить наглядные испытания рессорного подвешивания для ходовой двухосной тележки как на прямолинейных, так и на радиусных участках пути, быстро выполнять настройку и перенастройку таких характеристик как база тележки, масса тележки, жесткость упругих элементов, регулировать диаметр дроссельного отверстия в гасителях колебаний, изменять режим работы активных элементов, отрабатывать на действующем макете алгоритмы управления подвеской тележки без существенных трудозатрат. Применение такого макета тележки, наглядно демонстрирующего поведение подвески, может быть полезно при обучении студентов.

**Ключевые слова:** Рессорное подвешивание, активная подвеска, макетирование.

**Alexander V. Agunov**, D. Eng. Sci., professor, agunov\_av@yandex.ru; **\*Vyacheslav V. Kaverin**, post-graduate student, slavakaverin@gmail.com; **Elena I. Makarova**, D. Eng. Sci., professor, elt@pgups.ru; **Igor A. Rolle**, Cand. Eng. Sci., associate professor, igor.rollet@inbox.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) DEVELOPMENT OF THE UNIVERSAL COMPLEX FOR SUSPENSION OPERATION STUDY WITH ACTIVE ELEMENTS OF THE ROLLING STOCK BOGIE TRUCK. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-1-25-30

**Summary**

**Objective:** To develop a model of a rolling stock bogie truck for tests, settings and refinement of suspension control algorithms at the section of track with specified relief, profile and defects. The model has to be compact and make it possible to fulfill express settings of the major part of bogie suspension parameters. Moreover, it is necessary to develop a track model, as well as a test performance algorithm. In order to achieve the above-stated objectives it is essential to design such crucial components as an actuator with sufficient operation speed, hydraulic shock absorber and bogie frame. **Methods:** The design was carried out by means of analytical method. **Results:** The bogie truck model was presented, comprising the control system, bogie frame, wheel pair, active suspension elements, shock absorbers, drive system as well as the track. A test performance algorithm was introduced. The advantages and disadvantages of applying

the model in question were analyzed compared with a roller rig. **Practical importance:** The specified construction makes it possible to perform vivid tests of bogie suspension for a traversing two-axle bogie both at straight and radial track sections, carry out rapid setting and resetting of such characteristics as wheelbase, bogie mass, spring stiffness, control the diameter of snubber orifice in shock absorbers, change mode of operation of active components, as well as to develop bogie truck control algorithms on the service model with minimum labor cost. Application of the given model, clearly demonstrating the suspension behavior, may be useful for training students.

**Keywords:** Bogie suspension, active suspension, modeling.

## Введение

Проектирование активной подвески для подвижного состава железных дорог является сложной задачей с большим количеством неявно связанных между собой параметров. Именно поэтому при проектировании активной подвески подвижного состава железных дорог часто приходится прибегать к упрощениям, пренебрегать рядом факторов, влияющих на динамику взаимодействия элементов подвески и путевой структуры [1–13].

Компьютерное моделирование в настоящее время также не позволяет провести достаточно достоверные испытания модели. Подобный вид испытаний имеет те же недостатки, что и аналитический метод, связанные с использованием допустимых упрощений ряда факторов.

Эти обстоятельства влияют на качество работы подвески и, как следствие, приводят к занижению характеристик проектируемого подвижного состава в целом. Учитывая вышесказанное, можно прийти к выводу, что для получения более достоверных результатов целесообразно осуществлять физические испытания на масштабном макете тележки.

Для проведения исследований системы «колесо–рельс» широко применяются катковые стенды. Они, как правило, состоят из рамы с участком рельсового пути, в котором имеются разрывы с размещенными в них катками увеличенного диаметра, имитирующими рельс. Катки приводятся в движение от регулируемого электропривода. Изучаемая система рессорного подвешивания устанавливается колесами на катки (в основном используется

тележка подвижного состава). Для моделирования вертикальных и горизонтальных сил, действующих в точке контакта «колесо–рельс», применяются гидроцилиндры, находящиеся в местах крепления катков. Стенд управляется с помощью микропроцессорной системы.

Для каткового стенда характерны следующие недостатки:

- отсутствует возможность проведения испытаний ходовой тележки и тележек, имеющих различную базу;
- стенд не позволяет производить испытания на радиусных участках пути и в составе транспортного средства.

Для устранения вышперечисленных недостатков был спроектирован комплекс, состоящий из макета двухосной тележки и фрагмента рельсового пути. Кроме того, с помощью данного макета можно изменять такие характеристики транспортного средства как длина базы тележки, жесткость упругих элементов, величина диссипативной силы, возникающей в гасителях колебаний, а также, благодаря активным элементам, создавать по определенному закону вертикальные усилия в подвеске.

Создаваемая тележка должна соответствовать следующему: 1) число упругих связей в ней должно быть одинаковым с исследуемым объектом; 2) элементы упругих связей должны быть установлены в требуемых местах; 3) должны быть предусмотрены соответствующие крепежные элементы; 4) обладать регулируемым центром масс; 5) иметь регулируемую массу и регулируемую длину колесной базы тележки; 6) обладать настраиваемой жесткостью подвески; 7) иметь возможность настраивать диссипативные силы в гидравлических

гасителях колебаний; 8) включать в свой состав активные элементы подвески.

## Система управления

Система управления считывает показания с акселерометров (рис. 1, 5), установленных в районе шеек осей колесных пар, а также в центре рамы тележки, обрабатывает полученные данные в соответствии с заданным алгоритмом и генерирует сигналы для управления активными элементами подвески. Питание активных элементов осуществляется с помощью контроллеров. Кроме того, реализована возможность передачи данных по беспроводному каналу связи. В качестве контроллера используется плата Arduino Uno R3 (рис. 1, 3).

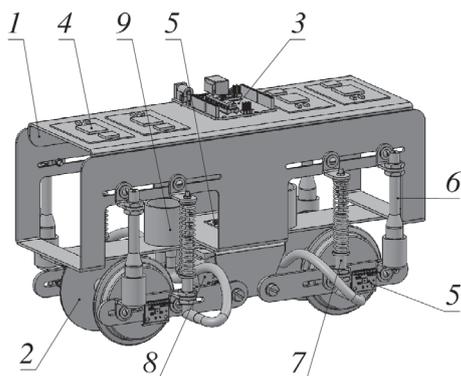


Рис. 1. Макет тележки:

- 1 – рама тележки; 2 – колесная пара;
- 3 – плата Arduino Uno; 4 – контроллер активного элемента подвески; 5 – акселерометр; 6 – активный элемент подвески; 7 – амортизатор; 8 – шаговый электродвигатель; 9 – расширительный масляный бак

## Рама макета тележки

В основе конструкции лежит рама макета тележки, состоящая из трех основных элементов, основания боковин и крыши. На раме размещается оборудование и устанавливаются элементы подвески, как активные, так и пассивные, для чего в деталях предусмотрен ряд

сквозных монтажных отверстий. Конструкция рамы тележки позволяет изменять колесную базу посредством перемещения осей колесных пар вдоль прорезей в рычагах. Детали рамы изготавливаются из листовой стали.

## Колесные пары

Для приведения макета тележки в движение используются колесные пары (рис. 1). Каждая из них состоит из двух колесных дисков, посаженных на ось колесной пары. Кроме колес, на одну из осей посажен шкив для передачи крутящего момента от двигателя.

## Активные элементы подвески

Активные элементы предназначены для создания вертикальных усилий в подвеске тележки. Управление активным элементом подвески осуществляется изменением тока, протекающего по катушке. Конструкция активного элемента подвески представлена на рис. 2. Возбуждение обеспечивается за счет постоянных магнитов. Принцип действия активных элементов аналогичен работе динамической головки.

## Амортизаторы

Конструкцию амортизатора иллюстрирует рис. 3. Он состоит из двух основных элементов, пружины и гасителя колебаний.

Гасители колебаний представляют собой полые цилиндры, сообщающиеся через дроссельное устройство с масляным баком. Жесткость пружины регулируется завинчиванием регулировочных гаек.

## Привод

Привод осуществляется от шагового электродвигателя 28BYJ-48 через клиноременную

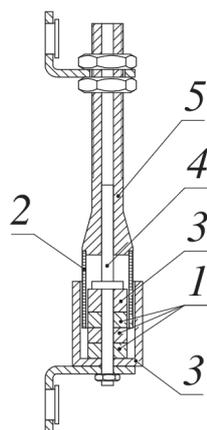


Рис. 2. Активный элемент подвески:  
1 – постоянный магнит; 2 – катушка;  
3 – магнитопровод; 4 – направляющая;  
5 – подвижная часть

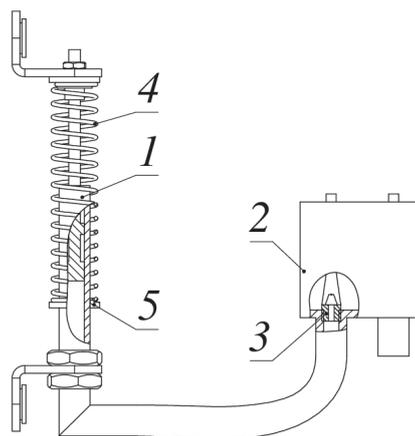


Рис. 3. Амортизатор:  
1 – гаситель колебаний; 2 – масляный бак;  
3 – дроссельное устройство; 4 – пружина;  
5 – регулировочная гайка

передачу на одну колесную пару, что дает возможность с достаточной точностью задавать скорость движения тележки. Ось электродвигателя расположена концентрично оси поворота рычагов подвески, позволяя уменьшить влияние клиноременной передачи на результаты испытаний.

### Набор грузов

Грузы выполнены в виде пластин из листовой стали с крепежными отверстиями. Набор грузов приводит к изменению массы тележки.

### Фрагмент пути

Путь собирается из фрагментов, каждый из которых имеет заданные профиль и дефекты. В начале и конце пути устанавливаются концевые выключатели, с помощью которых определяется конец пути, и происходит либо

остановка, либо реверсирование. Длина пути ограничивается размерами помещения, в котором предполагается проводить испытания, при этом на геометрию пути никакие ограничения не накладываются. Фрагменты пути состоят из нарезанных из фанеры при помощи лазера рельсов и шпал. Фрагмент пути представлен на рис. 4.

### Испытания

Был разработан следующий алгоритм проведения испытаний:

- выполняется настройка параметров рессорного подвешивания макета тележки;
- загружается алгоритм управления активными элементами подвески в контроллер;
- производится монтаж пути, имеющего необходимый профиль;
- макет тележки устанавливается на путь;
- осуществляется запуск макета с использованием беспроводного канала связи;

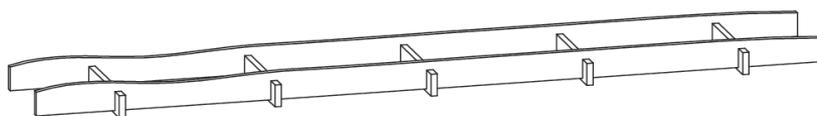


Рис. 4. Фрагмент пути

- макет начинает движение с заданными параметрами цикла (например, разгон, движение с постоянной скоростью, замедление) и останавливается в конце пути. Производится реверсирование движения, макет тележки доезжает до противоположного конца пути, прекращает движение и отправляет отчет на связанную с ним ЭВМ по беспроводному каналу связи.

## Заключение

Проанализированы преимущества и недостатки применения данного макета в сравнении с катковым стендом. В качестве основных преимуществ можно выделить возможность:

- проведения испытаний ходовой тележки;
- регулировки длины базы тележки;
- проведения испытаний на радиусных участках пути.

К основным недостаткам относятся:

- поведение масштабной модели может отличаться от поведения исследуемого объекта;
- для сборки испытательного пути требуется большое пространство.

## Библиографический список

1. Антипов В. А. Подавление вибрации агрегатов и узлов транспортных систем / В. А. Антипов. – М. : Маршрут, 2004. – 395 с.
2. Бухгольц Н. Н. Основной курс теоретической механики / Н. Н. Бухгольц. – М. : Наука, 1966. – 332 с.
3. Люк М. Стенд для исследования системы колесо–рельс / М. Люк и др. ; пер. с нем. // Железные дороги мира. – 2005. – № 4. – С. 41–46.
4. Кручек В. А. Особенности кинематического расчета осевого редуктора колесной пары с горизонтальной реактивной тягой в групповом тяговом приводе локомотива / В. А. Кручек, А. М. Евстафьев // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2017. – Т. 14, вып. 1. – С. 52–62.

5. Дембаримдекер А. Д. Амортизаторы с регулируемым сопротивлением / А. Д. Дембаримдекер // Автомобильная промышленность. – 1968. – № 3. – С. 42–45.

6. Дембаримдекер А. Д. Амортизаторы транспортных машин / А. Д. Дембаримдекер. – М. : Машиностроение, 1985. – 199 с.

7. Орлов П. И. Основы конструирования / П. И. Орлов. – М. : Машиностроение, 1977. – 623 с.

8. Кручек В. А. Влияние технологических погрешностей на кинематику вращательного перемещения осевого редуктора с горизонтальной реактивной тягой в групповом тяговом приводе локомотива / В. А. Кручек, А. М. Евстафьев // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2017. – Т. 14, вып. 2. – С. 256–266.

9. Медель В. Б. Подвижной состав электрических железных дорог. Конструкция и динамика : учебник для ин-тов ж.-д. транспорта / В. Б. Медель. – Изд. 4-е, перераб. – М. : Транспорт, 1974. – 232 с.

10. Гемке Р. Г. Неисправности электрических машин / Р. Г. Гемке. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 296 с.

11. Фурунжиев Р. И. Современные направления создания новых средств виброзащиты / Р. И. Фурунжиев, А. Н. Останкин. – Минск : Изд-во БНИИНТИТЭИ, 1976. – 45 с.

12. Goodall R. M. Active control of railway bogies – assessment of control strategies / R. M. Goodall, C. P. Ward // The International Symposium on Speed-Up and Sustainable Technology for Railway and Maglev Systems (STECH 2015). – Chiba, Japan. – 2015. – November 10–12. – P. 1–10.

13. Goodall R. M. Mechatronic developments for railway vehicles of the future / R. M. Goodall, W. Kortum // Control Engineering Practice. – October 2002. – P. 887–898.

## References

1. Antipov V. A. *Podavleniye vibratsii agregatov i uzlov transportnykh system* [Vibration control of power units and transportation hubs]. Moscow, Marshrut Publ., 2004, 395 p. (In Russian)

2. Bukhgoltz N. N. *Osnovnoy kurs teoreticheskoy mekhaniky [Theoretical mechanics: basic course]*. Moscow, Nauka Publ., 1966, 332 p. (In Russian)
3. Luke M. Stend dlya issledovaniya sistem koleso–rel's [Stand for the study of the system wheel–rail]. *Zhelezniye dorogyy mira [Railroads of the world]*, 2005, no. 4, pp. 41–46 (In Russian)
4. Kruchek V. A. & Evstafiyev A. M. Osobennosti kinemacheskogo rascheta osevogo reduktora kolesnoy pary s gorizontальной reaktivnoy tyagoy v gruppovom tyagovom privode lokomotiva [Kinematic calculation specificities of axle reduction gear of a wheel set with horizontal jet propulsion in group power actuator]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya [Proceedings of Petersburg Transport University]*. Saint Petersburg, Petersburg State Transport University Publ., 2017, vol. 14, issue 1, pp. 52–62. (In Russian)
5. Dembarimdeker A. D. Amortizatory s reguliruyemyym soprotivleniyem [Shock absorbers with adjustable resistance]. *Avtomobilnaya promyshlennost [Motor industry]*, 1968, no. 3, pp. 42–45. (In Russian)
6. Dembarimdeker A. D. *Amortizatory transportnykh mashin [Vehicle shock absorbers]*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1985, 199 p. (In Russian)
7. Orlov P. I. *Osnovy konstruirovaniya [Design principles]*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1977, 623 p. (In Russian)
8. Kruchek V. A. & Evstafiyev A. M. Vliyaniye tekhnologicheskikh pogreshnostey na kinematiku vrashchatelnogo peremeshcheniya osevogo reduktora s gorizontальной reaktivnoy tyagoy v gruppovom tyagovom privode lokomotiva [The influence of process errors on kinematics of axle reduction gear rotary movement with horizontal jet propulsion in group power actuator]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya [Proceedings of Petersburg Transport University]*. Saint Petersburg, Petersburg State Transport University Publ., 2017, vol. 14, issue 2, pp. 256–266. (In Russian)
9. Medel V. B. *Podvizhnoy sostav elektricheskikh zheleznykh dorog. Konstruktsiya i dinamika [Electric railways rolling stock. Design and dynamics]*. Uchebnik dlya in-tov zh.-d. transporta [Textbook for the universities of railway transport]. 4<sup>th</sup> ed. rev. Moscow, Transport Publ., 1974, 232 p. (In Russian)
10. Gemke R. G. *Neispravnosty elektricheskikh mashin [Disorder of electrical machines]*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989, 296 p. (In Russian)
11. Furunzhiyev R. I. & Ostankin A. N. *Sovremeniye napravleniya sozdaniya novykh sredstv vibrozashchity [The development of new vibration protection means: current trends]*. Minsk, BNIINTITEI Publ., 1976, 45 p. (In Russian)
12. Goodall R. M. & Ward C. P. Active control of railway bogies [Assessment of control strategies]. *The International Symposium on Speed-Up and Sustainable Technology for Railway and Maglev Systems (STECH 2015)*. Chiba, Japan, 2015, November 10–12, pp. 1–10.
13. Goodall R. M. & Kortum W. Mechatronic developments for railway vehicles of the future. *Control Engineering Practice*, October 2002, pp. 887–898.

АГУНОВ Александр Викторович – д-р техн. наук, профессор, agunov\_av@yandex.ru; \*КАВЕРИН Вячеслав Викторович – аспирант, slavakaverin@gmail.com; МАКАРОВА Елена Игоревна – д-р техн. наук, профессор, elt@rgups.ru; РОЛЛЕ Игорь Александрович – канд. техн. наук, доцент, igor.rollet@inbox.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 625.033.34

**А. Ю. Антонов****О ВНЕСЕНИИ ИЗМЕНЕНИЙ В РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ  
МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА  
НА ПУТЬ ПО УСЛОВИЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕГО НАДЕЖНОСТИ**

Дата поступления: 04.12.2018

Решение о публикации: 24.12.2018

**Аннотация**

**Цель:** Рассмотреть вопрос о необходимости внесения корректировок в «Методику оценки воздействия подвижного состава на путь по условию обеспечения его надежности» (далее – в Методику). Показать необходимость обновления заложенных в нее величин, которые оказывают влияние на параметры напряженно-деформированного состояния верхнего строения пути; определить возможность приведения данных величин в соответствии с современной конструкцией железнодорожного пути; внести изменения в расчетные формулы Методики, а также предложить проведение дополнительных мероприятий для обновления заложенных в Методику величин. **Методы:** Сравнение характеристик элементов верхнего строения пути, используемых в настоящее время, с теми, которые применялись при утверждении «Правил производства расчетов железнодорожного пути на прочность»; анализ аналитических выражений Методики и их корректировка. **Результаты:** Указана необходимость совершенствования параметров Методики. Установлено, какие расчетные формулы Методики требуют актуализации, вследствие изменений, произошедших в конструкции верхнего строения пути с момента первоначального определения значений данных величин. Для повышения достоверности результатов расчета следует учитывать большую вариативность условий эксплуатации железнодорожного транспорта. Выявлена необходимость в проведении дополнительного изучения приведенной массы железнодорожного пути. **Практическая значимость:** Показана необходимость уточнения значений приведенной массы пути, рекомендованных к применению в аналитических выражениях Методики. Их корректировка позволит повысить точность определения параметров напряженно-деформированного состояния верхнего строения пути. Предложенные изменения аналитических выражений Методики могут быть рекомендованы к практическому использованию.

**Ключевые слова:** Железнодорожный путь, взаимодействие пути и подвижного состава, динамическая нагрузка колеса на рельс, расчет пути на прочность, приведенная масса пути.

**Anton Yu. Antonov**, postgraduate student, antonov@pgups.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) ON INTRODUCTION OF CHANGES IN CALCULATION FORMULAS OF IMPACT ASSESSMENT METHOD OF THE ROLLING STOCK INFLUENCE ON THE TRACK BY THE CONDITION OF ITS RELIABILITY. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-1-31-36

**Summary**

**Objective:** To consider the question about correction necessity of the Method of evaluation of the rolling stock influence on the railway track by condition of its reliability (further – the Method). To show the need to update the values included in the Method, which affect the parameters of the stress-strain condition of the railway track superstructure; to determine the possibility of changing these values according to the modern railway track structure; to change formulas of the Method and suggest additional measures for renewing of the magnitudes in question. **Methods:** Comparison of the current railway track characteristics with those which were used in the Rules of the railway track strength calculation; analysis

of analytical expressions applied in the Method and their correction. **Results:** The necessity of improving the parameters of the Method was indicated. It was detected which of the formulas used in the Method require updating according to the changes of the elements of the railway track structure since the initial definition of the parameters of the given values. In order to increase the reliability of calculation results, a wide variability in the railway transport operating conditions is to be taken into account. The necessity to carry background study of the track equal mass was identified. **Practical importance:** The need to specify the values of the railway track equal mass, recommended to apply in analytical expressions of the Method was shown. The correction in question will improve the accuracy of determining the stress-strain condition parameters of the railway track superstructure. The proposed changes of analytical expressions might be recommended for practical use.

**Keywords:** Railway track, train-track interaction, dynamic wheel load on the rail, strength calculation of the railway track, equivalent track mass.

В 1914 г. отечественными учеными была разработана первая инструкция по определению нагрузок на железнодорожный путь и скоростей движения поездов в зависимости от типа верхнего строения пути. В дальнейшем она переиздавалась в 1925, 1931, 1936 и 1941 гг. [1]. После учреждения в начале XX в. Экспериментального института путей сообщения начали широко проводиться экспериментальные исследования по взаимодействию пути и подвижного состава. В 1944 г. проф. Г. М. Шахуняцем в учебнике [2] целый раздел был посвящен статическому и динамическому расчетам железнодорожного пути. Были предложены формулы для определения динамических реакций рельса в точке приложения переменной силы. В них учитывалось влияние непрерывных и изолированных неровностей пути на составляющие вертикальных сил, возникающих при движении подвижного состава по пути.

Позже проф. М. Ф. Вериго ввел теорию вероятности в расчет железнодорожного пути на прочность, так как вероятность одновременного совпадения наибольших возможных динамических сил близка к нулю. В работе «Взаимодействие пути и подвижного состава» [3] впервые были даны формулы, использованные при создании «Правил производства расчетов железнодорожного пути на прочность», а также произведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными, что позволило подтвердить достоверность применения таких формул на практике.

В 1972 г. под редакцией М. Ф. Вериго был выпущен труд «Динамические исследования пути и корректировка правил расчетов железнодорожного пути на прочность» [4], в котором принимались во внимание изменения условий эксплуатации и текущего содержания пути, произошедшие за два предыдущие десятилетия. Помимо этого в расчетные формулы был введен коэффициент  $\alpha_0$ , учитывающий характеристику элементов железнодорожного пути и равный отношению необрессоренной массы колеса  $m_k$  к сумме необрессоренной массы колеса  $m_k$  и приведенной к контакту колеса и рельса массы пути  $m_{\Pi}$ :

$$\alpha_0 = \frac{m_k}{m_k + m_{\Pi}}.$$

До внесения корректировок в «Правила производства расчетов верхнего строения железнодорожного пути на прочность» [5] предполагалось, что величина  $\alpha_0$  может быть принята равной единице. Масса колеса принималась существенно больше приведенной массы пути  $m_k \gg m_{\Pi}$ . Однако затем выяснилось, что определение среднеквадратичного отклонения сил инерции необрессоренной массы, возникающих при качении колеса с плавной изолированной неровностью  $S_{\text{инк}}$  для железобетонной шпалы, приводило к завышенным значениям, поскольку путь с железобетонными шпалами обладает более высокой жесткостью. Поэтому в формулы для расчета сил инерции необрессоренных масс было при-

нято решение ввести дополнительные коэффициенты  $\alpha_0$  и  $\alpha_1$ .

Основываясь на ряде теоретических и экспериментальных исследований [6–9], М. Ф. Вериги вывел формулы для определения приведенной массы железнодорожного пути (см. [4]). Рассматривалось взаимодействие четырехосного вагона на тележках типа ЦНИИ-ХЗ при скорости движения 100 км/ч для пути с рельсами типа Р50 на деревянных шпалах (эпюра шпал 1840 шт/км) и щебеночном балластном слое толщиной 45 см. Были получены следующие значения масс элементов железнодорожного пути (в кг·с<sup>2</sup>/см):  $m_{ршр}^0 = 0,185$ ,  $m_6^0 = 0,745$ ,  $m_{тр}^0 = 0,341$ . Для пути на деревянных шпалах приведенная масса пути  $m_{п}^{д.ш} = 1,271$  кг·с<sup>2</sup>/см.

Определение приведенной массы железнодорожного пути на железобетонных шпалах было выполнено с учетом ряда допущений. Из-за отсутствия необходимых экспериментальных данных приведенная масса объема грунта, участвующего во взаимодействии пути и подвижного состава, была принята равной массе, вычисленной для пути на деревянных шпалах. Масса балластного слоя была изменена с учетом погонного веса балласта, вызванного изменением расчетной толщины балластного слоя под шпалой с 45 до 50 см, и составила  $m_6^0 = 0,828$  кг·с<sup>2</sup>/см. Масса рельсошпальной решетки с учетом веса железобетонной шпалы  $m_{ршр}^0 = 0,269$  кг·с<sup>2</sup>/см. Сумма масс элементов пути с железобетонными шпалами оказалась равна  $m_{п}^{жб.ш} = 1,438$  кг·с<sup>2</sup>/см.

Таким образом, согласно полученному значению массы  $m_{п}$  и известным  $m_{к}$ , был определен коэффициент  $\alpha_0$ . Для пути на деревянных шпалах он составил 0,433, а для пути на железобетонных шпалах – 0,403.

Результаты этих исследований заложены и в действующую «Методику оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности» (далее – в Методику) [10]. Коэффициент  $\alpha_0$  принимается равным 0,433 и 0,403 для любого расчетного случая (без учета изменений в толщине балластного слоя, типа промежуточного скрепления и мас-

сы элементов стыкового скрепления) на пути с деревянными и железобетонными шпалами соответственно.

Очевидно, что эти величины коэффициентов  $\alpha_0$  и  $\alpha_1$  нуждаются в корректировке, поскольку произошли значительные изменения в конструкции пути как в целом, так и ее элементов. Например, принятая М. Ф. Вериги в 1972 г. при внесении корректировок величина массы балластного слоя справедлива лишь для двух расчетных случаев: 45 см для пути на деревянных шпалах и 50 см для пути на железобетонных, что не совпадает с параметрами типовых конструкций элементов верхнего строения пути [11]. Кроме того, появились новые конструкции подрельсового основания, в том числе безбалластные. Эксперименты, дифференцированные по группам основных факторов, показывают, что при взаимодействии пути и подвижного состава масса пути, участвующая в соударении, изменяется в зависимости от многих факторов, например и вышеуказанных, весьма значительно [12–14]. Поэтому следует внести изменения в расчетные значения  $\alpha_0$  и  $\alpha_1$ .

Поскольку, как показано выше, принятые в Методике значения коэффициента  $\alpha_0$  справедливы лишь для одного расчетного случая – с определенными типом рельса, толщиной балластного слоя и отнесенным к колесу весом необрессоренных частей экипажа – необходимо в расчетные формулы Методики вместо коэффициента  $\alpha_0$  ввести либо величины приведенной массы пути  $m_{п}$  и массы необрессоренных частей экипажа  $m_{к}$ , соответствующих конкретному расчетному случаю, либо вариативность значений как  $\alpha_0$ , так и  $\alpha_1$ . Масса  $m_{к}$  определяется как отношение отнесенного к колесу весу  $q$  необрессоренных частей экипажа, кг (ее значения приведены для различных типов локомотивов и вагонов в табл. 1 Методики), к ускорению силы тяжести  $g = 9,81$  см/с<sup>2</sup>:

$$m_{к} = \frac{q}{g}.$$

Приведенная масса пути  $m_{\text{п}}$  складывается из участвующих во взаимодействии колеса и рельса масс рельсошпальной решетки  $m_{\text{ршр}}^0$ , балластного слоя  $m_{\text{б}}^0$  и слоя земляного полотна  $m_{\text{гр}}^0$ :

$$m_{\text{п}} = m_{\text{ршр}}^0 + m_{\text{б}}^0 + m_{\text{гр}}^0.$$

Учет массы необрессоренных частей экипажа и приведенной массы пути в расчетных формулах Методики производится через коэффициент  $\alpha_0$ :

$$\alpha_0 = \frac{m_{\text{к}}}{m_{\text{к}} + m_{\text{п}}}.$$

При замене коэффициента  $\alpha_0$  на  $m_{\text{к}}$  и  $m_{\text{п}}$  при расчете среднеквадратических отклонений динамической нагрузки колеса на рельс от сил инерции, возникающих из-за наличия на поверхности катания колес плавных изолированных неровностей  $S_{\text{инк}}$  и непрерывных неровностей на поверхности катания колес  $S_{\text{ннк}}$ , формулы будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} S_{\text{инк}} &= 0,25 \cdot y_{\text{max}} \cdot \frac{2 \cdot U}{k} \cdot \alpha_0 = \\ &= 0,735 \cdot e_0 \cdot \frac{U}{k} \cdot \frac{m_{\text{к}}}{m_{\text{к}} + m_{\text{п}}}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} S_{\text{ннк}} &= \frac{\alpha_0 \cdot K_1 \cdot U \cdot V^2 \cdot \sqrt{q}}{d^2 \cdot \sqrt{k \cdot U - 3,26 \cdot k \cdot q}} = \\ &= \frac{m_{\text{к}} \cdot K_1 \cdot U \cdot V^2 \cdot \sqrt{q}}{(m_{\text{к}} + m_{\text{п}}) \cdot d^2 \cdot \sqrt{k \cdot U - 3,26 \cdot k \cdot q}}. \end{aligned} \quad (2)$$

В (1), (2)  $U$  – модуль упругости рельсового основания, кг/см<sup>2</sup>;  $k$  – коэффициент относительной жесткости рельса и рельсового основания, см<sup>-1</sup>;  $y_{\text{max}}$  – наибольший дополнительный прогиб рельса при вынужденных колебаниях катящегося по ровному рельсу колеса с изолированной неровностью на поверхности катания, отнесенный к глубине изолированной неровности на колесе, принятой равной

1 см;  $e_0$  – расчетная глубина изолированной неровности на поверхности катания колеса, см;  $K_1$  – коэффициент, характеризующий степень неравномерности образования поверхности катания колес;  $q$  – отнесенный к колесу вес неподрессоренных частей, кг;  $V$  – скорость движения, км/ч;  $d$  – диаметр колес, см.

Для практических расчетов целесообразно вводить переменное значение коэффициента  $\alpha_0$ . Тогда коэффициент  $\alpha_1$  будет определяться как отношение коэффициента  $\alpha_0^i$  для расчетной конструкции пути к величине  $\alpha_0^{\text{д.ш}}$ , принятой для пути на деревянных шпалах:

$$\alpha_1 = \frac{\alpha_0^i}{\alpha_0^{\text{д.ш}}} = \frac{\frac{m_{\text{к}}}{m_{\text{к}} + m_{\text{п}}^i}}{\frac{m_{\text{к}}}{m_{\text{к}} + m_{\text{п}}^{\text{д.ш}}}} = \frac{m_{\text{к}} + m_{\text{п}}^{\text{д.ш}}}{m_{\text{к}} + m_{\text{п}}^i}, \quad (3)$$

где  $m_{\text{к}}$  – необрессоренная масса колеса;  $m_{\text{п}}^{\text{д.ш}}$  – приведенная масса пути на деревянных шпалах;  $m_{\text{п}}^i$  – приведенная масса расчетной конструкции пути.

Среднеквадратическое отклонение динамической нагрузки колеса на рельс  $S_{\text{нп}}$  от сил инерции неподрессоренных масс  $P_{\text{нп}}$ , возникающих при проходе изолированной неровности пути, с учетом выражения (3) будет определяться следующим образом:

$$\begin{aligned} S_{\text{нп}} &= 0,565 \cdot 10^{-8} \cdot \alpha_1 \cdot \beta \cdot \varepsilon \times \\ &\times \gamma \cdot l \cdot \sqrt{\frac{U}{k}} \cdot \sqrt{q} \cdot V \cdot \bar{P} = \\ &= 0,565 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{m_{\text{к}} + m_{\text{п}}^{\text{д.ш}}}{m_{\text{к}} + m_{\text{п}}^i} \times \\ &\times \beta \cdot \varepsilon \cdot \gamma \cdot l \cdot \sqrt{\frac{U}{k}} \cdot \sqrt{q} \cdot V \cdot \bar{P}. \end{aligned} \quad (4)$$

Однако утяжелять формулу (4) величинами  $m_{\text{к}}$  и  $m_{\text{п}}$  не стоит. В соответствии с определяемым вариантом условий эксплуатации (параметры конструкции пути и подвижного состава) найти  $\alpha_1$  можно через известные значения коэффициента  $\alpha_0$ . Следовательно, формула для определения  $S_{\text{нп}}$  примет вид

$$S_{\text{нп}} = 0,565 \cdot 10^{-8} \cdot \alpha_1^i \cdot \beta \cdot \varepsilon \cdot \gamma \cdot l \cdot \sqrt{\frac{U}{k}} \cdot \sqrt{q} \cdot V \cdot \bar{P}.$$

Здесь коэффициент  $\alpha_1^i$  отличается от используемого в настоящее время в Методике  $\alpha_1$  большей вариативностью значений. Коэффициенты  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\varepsilon$  определяются в зависимости от типа рельса, рода балласта и материала шпалы.

Ранее этот вопрос рассматривался в статье [15]. К применению в расчетных формулах Методики были предложены уточненные коэффициенты  $\alpha_0$  и  $\alpha_1$ . Численные значения коэффициентов были определены в зависимости от рода грунта при помощи метода конечных элементов для пути на деревянных и железобетонных шпалах.

Для уточнения параметров напряженно-деформированного состояния пути, возникающего при взаимодействии колеса и рельса, требуется скорректировать величины  $m_{\text{п}}$ ,  $\alpha_0$  и  $\alpha_1$ , заложенные в Методику, которые изменяются только лишь в зависимости от типа шпал. Для лучшей достоверности результатов Методики оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности необходим учет вариативности эксплуатационных условий.

## Библиографический список

1. Стоянович Г. М. Расчеты верхнего строения пути на прочность и устойчивость : курс лекций / Г. М. Стоянович. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2013. – 79 с.
2. Шахунянец Г. М. Устройство железнодорожного пути : учебник для вузов ж.-д. транспорта / Г. М. Шахунянец. – М. : Трансжелдориздат, 1944. – 481 с.
3. Вериго М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава / М. Ф. Вериго, А. Х. Ветченко, О. П. Ершков, С. Н. Попов, Б. Д. Хейстер // Труды ВНИИЖТ. Вып. 97. – М. : Трансжелдориздат, 1955. – 412 с.
4. Динамические исследования пути и корректировка правил расчетов железнодорожного пути на прочность / под ред. М. Ф. Вериго // Труды ВНИИЖТ. Вып. 466. – М. : Транспорт, 1972. – 192 с.
5. Правила производства расчетов верхнего строения железнодорожного пути на прочность / Воен. акад. тыла и транспорта. – Л. : Воен. Академия тыла и транспорта, 1964. – 49 с.
6. Шмидт К. М. Влияние массы пути на деформацию его при ударе колеса с подрессоренным грузом / К. М. Шмидт // Сб. НИИ пути и путевого хозяйства. – М. : Трансжелдориздат, 1941. – С. 87–109.
7. Попов А. А. К вопросу о динамическом воздействии колеса на рельс при прохождении неровности пути / А. А. Попов // Труды ЦНИИ МПС. Вып. 33. – М. : Трансжелдориздат, 1949. – 121 с.
8. Мендель В. Б. Взаимодействие электровоза и пути / В. Б. Мендель. – М. : Трансжелдориздат, 1956. – 334 с.
9. Гасанов А. И. О приведенной массе пути / А. И. Гасанов // Вестн. ЦНИИ МПС. – 1968. – № 6. – С. 52–53.
10. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности. – Утв. МПС РФ № ЦПТ-52/14 от 16 июня 2000 г. – М. : МПС РФ, 2000. – 40 с.
11. СП 119.13330.2012. Железные дороги колеи 1520 мм. – Актуализир. ред. СНиП 32-01-95. – Утв. Министерством регионального развития РФ № 276 от 30 июня 2012 г. – М. : ФАУ «ФЦС», 2012. – 52 с.
12. Вериго М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава / М. Ф. Вериго, А. Я. Коган. – М. : Транспорт, 1986. – 559 с.
13. Шахунянец Г. М. Железнодорожный путь : учебник для вузов ж.-д. транспорта. – 3-е изд., перераб. и доп. / Г. М. Шахунянец. – М. : Транспорт, 1987. – 479 с.
14. Яковлев В. Ф. Путь и путевое хозяйство промышленных железных дорог / В. Ф. Яковлев, Б. А. Евдокимов, В. Е. Парунакян, А. Н. Перцев. – М. : Транспорт, 1990. – 341 с.
15. Рыбкин В. В. О корректировке правил расчетов железнодорожного пути на прочность / В. В. Рыбкин, И. А. Бондаренко // Вестн. Белорус. гос. ун-та транспорта. Наука и транспорт. – 2004. – № 2 (9). – С. 42–44.

## References

1. Stoyanovich G. M. *Raschety verkhnego stroeniya puti na prochnost i ustoychivost* [Calculations for strength and stability of the superstructure]. Khabarovsk, Far Eastern State Transport University Publ., 2013, 79 p. (In Russian)
2. Shakhunyants G. M. *Ustroystvo zheleznodorozhnogo puti: uchebnyk dlya vuzov zh. d. transporta* [Construction of the track: textbook for universities of railroad transport]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1944, 481 p. (In Russian)
3. Verigo M. F., Vetchenko A. Kh., Ershkov O. P., Popov S. N. & Kheystver B. D. *Vzaimodeystvie puti i podvizhnogo sostava* [Track and rolling stock interaction]. *Trudy VNIIZhT* [VNIIZhT Proceedings]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1955, issue 97, 412 p. (In Russian)
4. *Dinamicheskie issledovaniya puti i korrekcirovka pravil raschetov zheleznodorozhnogo puti na prochnost* [Dynamic analysis of the track and adjustment of design rules for track strength]. Ed. by M. F. Verigo. *Trudy VNIIZhT* [VNIIZhT Proceedings]. Moscow, Transport Publ., 1972, issue 466, 192 p. (In Russian)
5. *Pravila proizvodstva raschetov verkhnego stroeniya zheleznodorozhnogo puti na prochnost* [Calculation rules for strength of track structure]. Leningrad, Military Academy of Transport and Logistics Publ., 1964, 49 p. (In Russian)
6. Shmidt K. M. *Vliyanie massy puti na deformatsiyu ego pri udare koleasa s podressorennym gruzom* [The influence of track load on its deformation when hit by a wheel with spring-borne load]. *Sbornik NII puti i putevogo khozyaystva* [Coll. Papers of Research Institute for Track and Track Facilities]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1941, pp. 87–109 (In Russian)
7. Popov A. A. *K voprosu o dinamicheskom vozdeystvii koleasa na rels pri prokhozhenii nerovnosti puti* [On dynamic impact of the rail on the wheel when passing track irregularity]. *Trudy TsNII MPS* [Proceedings the Ministry of Railways Central Scientific Research Institute]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1949, issue 33, 121 p. (In Russian)
8. Mendel' V. B. *Vzaimodeystvie elektrovoza i puti* [Electric locomotive and track interaction]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1956, 334 p. (In Russian)
9. Gasanov A. I. *O privedennoy masse puti* [On adjusted track load]. *Vestnik TsNII MPS* [Bulletin the Ministry of Railways Central Scientific Research Institute], 1968, no. 6, pp. 52–53. (In Russian)
10. *Metodika otsenki vozdeystviya podvizhnogo sostava na put po usloviyam obespecheniya ego nadezhnosti* [The assessment method of the rolling stock influence on the track by its reliability control conditions]. Utv. MPS RF no. TsPT-52/14 [Appr. by the Ministry of Railways of the Russian Federation no. TsPT-52/14, dated 16<sup>th</sup>, June 2000]. Moscow, The Ministry of Railways of the Russian Federation Publ., 2000, 40 p. (In Russian)
11. *SP 119.13330.2012. Zheleznye dorogi kolei 1520 mm. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 32-01-95* [Set of rules 119.13330.2012. 1520 mm gauge railroads. Revised edition of SNIp (Construction rules and regulations) 32-01-95]. Utv. Ministerstvom regional'nogo razvitiya RF N 276 [Appr. by the Ministry of Regional Development of the Russian Federation no. 276, 30<sup>th</sup>, June 2012]. Moscow, Federal Center for regulation and standardization Publ., 2012, 52 p. (In Russian)
12. Verigo M. F. & Kogan A. Ya. *Vzaimodeystvie puti i podvizhnogo sostava* [The rolling stock and track interaction]. Moscow, Transport Publ., 1986, 559 p. (In Russian)
13. Shakhunyants G. M. *Zheleznodorozhnyy put* [The railway track]. Uchebnyk dlya vuzov zh.-d. transporta [Textbook for universities of railway transport]. 3d ed., rev. and enl. Moscow, Transport Publ., 1987, 479 p. (In Russian)
14. Yakovlev V. F., Yevdokimov B. A., Parunakyan V. Ye. & Pertsev A. N. *Put i putevoe khozyaystvo promyshlennykh zheleznykh dorog* [Track and track facilities of industrial railroads]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1990, 341 p. (In Russian)
15. Rybkin V. V. & Bondarenko I. A. *O korrekcirovke pravil raschetov zheleznodorozhnogo puti na prochnost* [On the adjustment of design rules for the railway track strength]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta. Nauka i transport* [Bulletin of the Belarusian State University of Transport. Science and transport], 2004, no. 2 (9), pp. 42–44. (In Russian)

АНТОНОВ Антон Юрьевич – аспирант, antonov@pgups.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 629.01

**Е. В. Афанасьев, Н. А. Битюцкий, Л. В. Цыганская,  
Е. А. Исполова, И. О. Филиппова**

## **ОБНОВЛЕНИЕ ПАРКА ВАГОНОВ–ХОППЕРОВ ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА**

Дата поступления: 26.11.2018

Решение о публикации: 03.12.2018

### **Аннотация**

**Цель:** Разработка новых технических решений, направленных на совершенствование конструкции вагона-хоппера для перевозки технического углерода и увеличение срока его службы. **Методы:** Проведены теоретические и экспериментальные исследования. При осуществлении теоретических исследований применены метод конечных элементов и программный комплекс ANSYS. При проведении экспериментов использовалось поверенное и аттестованное испытательное оборудование, в том числе микропроцессорная многоканальная тензометрическая система, стенд растяжения–сжатия, тензометрическая автосцепка, стенд «Горка». **Результаты:** Выполнены обзор и анализ существующих конструкций вагонов-хопперов для перевозки технического углерода, которые позволили выявить их недостатки и определить пути совершенствования. Разработаны методики расчета прочности, учитывающие особенности нагружения вагона-хоппера для перевозки технического углерода. Прочностные и динамические качества вагона-хоппера для перевозки технического углерода подтверждают полученные теоретические данные. Расхождение между теоретическими и экспериментальными значениями при изучении прочности конструкции кузова вагона-хоппера составило 15%. **Практическая значимость:** Создана конструкция вагона-хоппера для перевозки технического углерода с улучшенными технико-экономическими показателями. Предложены новые технические решения, позволяющие на 25% увеличить срок службы вагона-хоппера для перевозки технического углерода по сравнению с ранее выпущенными моделями вагонов, а также разработаны программы и методики испытаний.

**Ключевые слова:** Вагон-хоппер, технический углерод, сертификация вагона, усталостная прочность, увеличенный срок службы вагона.

**Evgeniy V. Afanasiyev**, Cand. Eng. Sci., manager of the car-building products test center, aev@engcenter.ru (OOO “The Rolling Stock Engineering Centre”); **Nikita A. Bityutskiy**, Cand. Eng. Sci., engineering director, bna@engcenter.ru (OOO “The Rolling Stock Expert Center”); **Lyudmila V. Tsyganskaya**, Cand. Eng. Sci., associate professor, tcyganskaya@gmail.com (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University); **Ekaterina A. Ispolova**, head of engineering design division of research and development bureau, katie-kat@mail.ru; **Irina O. Filippova**, junior research assistant of research and development bureau, filippova.io@yandex.ru (AO “Innovation and Research Center “Railroad cars””) FLEET OF HOPPER CARS RENEWAL DESIGNED TO TRANSPORT CARBON. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-1-37-50

### **Summary**

**Objective:** To develop new technical solutions aimed at design improvement of a hopper car built to transport carbon as well as service life increase. **Methods:** Theoretical and experimental research was carried out. Finite elements method and ANSYS software complex were applied when conducting theoretical research. Accepted and certified equipment including microprocessor-based multichannel strain gage system, stretching-compressing testing facility, strain-gage automatic coupling, “Hump” testing facility was used as part of experimental research. **Results:** Survey and analysis of the existing hopper-cars

designed to transport carbon was carried out making it possible to detect the drawbacks and find the ways of improvement. Methods of strength analysis were developed, taking into account loading characteristics of the hopper car designed to transport carbon. Strength and dynamic qualities of the hopper-car for carbon transportation justify the obtained theoretical data. Discrepancy between theoretical and experimental values during strength analysis of hopper-car body structure comprised 15%. **Practical importance:** The design of a hopper car for carbon transportation with improved technical-economic indices was developed. New engineering solutions were introduced, making it possible to increase service life of the hopper-car designed to transport carbon by 25% in comparison with earlier released car models. Test programs and procedures were devised.

**Keywords:** Hopper car, carbon, car certification, fatigue strength, extended service life.

Технический углерод (техуглерод, англ. *carbon black*) применяется в качестве усиливающего компонента в производстве резин и других пластических масс. Около 70% всего выпускаемого технического углерода используется в производстве шин, примерно 20% – в производстве резинотехнических изделий, приблизительно 10% – в качестве черного пигмента, замедлителя «старения» пластмасс, компонента, придающего пластмассам специальные свойства: электропроводные, способность поглощать ультрафиолетовое излучение, излучение радаров. Насыпная плотность составляет 0,33–0,42 т/м<sup>3</sup>.

Ежегодно в мире производится около 10 млн т технического углерода, в том числе в России около 700 тыс. т. Основные производители в России:

- ООО «Омсктехуглерод», г. Омск. . . . . 40%,
- АО «Ярославский технический углерод», г. Ярославль . . . . . 32%,
- АО «Нижекамсктехуглерод», г. Нижнекамск. . . . . 17%,
- прочие производители . . . . . 11%.

Транспортировка потребителям осуществляется как автомобильным, так и железнодорожным транспортом. Для перевозки автомобильным транспортом используется специальная тара (мешки, контейнеры). По железной дороге технический углерод, ввиду его относительно небольшой плотности, перевозится в специальных вагонах-хопперах увеличенного объема [1].

Первые вагоны для перевозки технического углерода с объемом кузова 136 м<sup>3</sup> (модель 20-403) стали производиться в начале 1960-х годов на Днепродзержинском вагоностроительном заводе (ДВЗ) им. «Газеты Правда» (рис. 1, а) и выпускались до 1979 г. Затем на этом заводе был освоен выпуск модели 25-4001 с увеличенным до 146 м<sup>3</sup> объемом кузова, который производился до 1989 г. (рис. 1, б). Начиная с 1989 г. на ОАО «Днепровагонмаш» (бывший ДВЗ им. «Газеты Правда»), поставлен на производство усовершенствованный вариант вагона-хоппера – модель 25-4046 (рис. 1, в) [2].

Все рассмотренные модели вагонов-хопперов представляют собой цельнометаллическую кузовную конструкцию, обеспечивающую возможность механизированной загрузки груза самоходом через загрузочные люки на крыше и полную выгрузку в межрельсовое пространство через нижние люки. Механизм разгрузки – с ручным приводом открывания люков – гарантирует полную сохранность перевозимого груза благодаря конструктивным особенностям затворов люков, а крытый кузов обеспечивает защиту груза от атмосферного воздействия. Вагоны также могут быть использованы для транспортировки аналогичных грузов.

Учитывая ограниченный парк выпущенных вагонов и завершение срока их службы (возраст парка вагонов: 18–32 года), в 2005 г. по заявке АО «Ярославский технический углерод» специалистами группы компаний



Рис. 1. Вагоны-хопเปอร์ы моделей 20-403 (а), 25-4001 (б) и 25-4046 (в)

«Инженерный Центр вагоностроения» (Санкт-Петербург) была предложена схема производства капитального ремонта с продлением срока полезного использования (КРП).

Разработка и постановка на производство проекта КРП стали возможными благодаря выполненному комплексу работ, который

включал обследование технического состояния вагонов с истекшим сроком службы и оценку интенсивности их эксплуатации. Его результаты показали, что накопленные вагонами эксплуатационные повреждения являются типовыми для данного вида подвижного состава и не критические с точки зрения невоз-

возможности или сложности их устранения при проведении ремонта. Основные элементы несущей металлоконструкции кузова и рамы не подвержены существенным коррозионным повреждениям, а толщины элементов соответствуют минусовым допускам на прокат при производстве.

Предложенный подвижной состав в эксплуатации используется со значительно меньшей интенсивностью по сравнению с универсальными полувагонами (коэффициент порожнего пробега – 0,5; недоиспользование – 25% допускаемой осевой нагрузки) [3]. Эти обстоятельства, а также возросшая потребность в вагонах такого типа позволили обосновать возможность проведения работ и успешно реализовать в 2005 г. проект КРП в вагоноремонтном депо «Тверь».

Работы по КРП проводились с 2005 по 2011 г., однако в связи с административными ограничениями продления срока службы, принятыми Правительством РФ, со вступлением в силу Технического регламента Таможенного союза «О безопасности железнодорожного подвижного состава» ТР ТС 001/2011 [4] и изменениями в «Правилах технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации» [5] в период с 2013 по 2015 г., работы по проекту были прекращены.

Для обеспечения отгрузки готовой продукции железнодорожным транспортом, а также

из-за сложностей производства и реализации новых вагонов данного типа украинскими предприятиями в последнее время возникла необходимость разработки и постановки на производство подобных вагонов на территории РФ.

ПКБ АО «ВНИИЖТ» (Москва) по заказу ООО «Торговый дом “ВЖК”» (Москва) при участии ФГБОУ ВО ПГУПС (Санкт-Петербург), ООО «ИЦПС» (Санкт-Петербург) и АО «Научно-внедренческий центр “Вагоны”» (Санкт-Петербург) были выполнены разработка и постановка на производство на ОАО «Ярославский вагоноремонтный завод (ВРЗ) “Ремпутьмаш”» новой модели вагона для перевозки технического углерода (модель 19-6930) с аналогичными технико-экономическими параметрами и увеличенным до 32 лет сроком службы. Общий вид вагона представлен на рис. 2. Материалы, применяемые в элементах конструкции вагона, и основные составные части приведены в табл. 1. Сравнение параметров указанных выше моделей вагонов-хопперов проведено в табл. 2.

Вагон-хоппер модели 19-6930 выполнен в исполнении умеренного и холодного климата (УХЛ) для категории размещения 1 по ГОСТ 15150–69 [6] с обеспечением эксплуатационной надежности в диапазоне температур воздуха от –60 до +50 °С.

Основные составные части вагона-хоппера модели 19-6930 иллюстрирует рис. 3.



Рис. 2. Вагон-хоппер модели 19-6930

ТАБЛИЦА 1. Материалы, применяемые в элементах конструкции вагона-хоппера модели 19-6930

Элемент конструкции	Материал/марка стали	Класс прочности/ категория
Хребтовая балка	Зетовый профиль по ГОСТ 5267.3–90 из стали марок 10Г2БД, 10Г2Б, 10ХСНД, 09Г2С по ГОСТ 19281–2014 или стали марок 12Г2Ф, 12Г2ФД по ТУ 14-1-5391–99	Не ниже 345/ не ниже 14
Рама боковая, торцевые стены, бункеры, крыша	Сталь марок 09Г2С, 09Г2Д, 09Г2СД, 10ХСНД по ГОСТ 19281–2014	Не ниже 345 для толщин до 10 мм/ не ниже 14
		Не ниже 325 для толщин более 10 мм/ не ниже 14
Обшивка боковых и торцевых стен, бункеров, крыши	Сталь марок 09Г2С, 09Г2СД, 10ХНДП по ГОСТ 19281–2014	Не ниже 345/ не ниже 14
Детали тормозной рычажной передачи	Сталь марок 09Г2, 09Г2С, 09Г2Д, 09Г2СД по ГОСТ 19281–2014 или сталь 10Г по ГОСТ 4543–71	Не ниже 295 для толщин до 32 мм/ не ниже 14
		Не ниже 265 для толщин более 32 мм/ не ниже 14
Прочие детали из сортового проката	Сталь марок 09Г2, 09Г2С, 09Г2Д, 09Г2СД по ГОСТ 19281–2014	Не ниже 295/ не ниже 12
Детали, не влияющие на прочность конструкции в целом	Сталь по ГОСТ 380–2005, ГОСТ 535–2005, ГОСТ 14637–89, ГОСТ 16523–97, ГОСТ 1050–2013	

Примечание. ГОСТ 5267.3–90. Профиль зетовый для хребтовой балки. Сортамент; ГОСТ 19281–2014. Прокат повышенной прочности. Общие технические условия; ГОСТ 4543–71. Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия; ГОСТ 380–2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки; ГОСТ 535–2005. Прокат сортовой и фасонный из стали углеродистой обыкновенного качества. Общие технические условия;

ГОСТ 14637–89. Прокат толстолистовой из углеродистой стали обыкновенного качества. Технические условия;

ГОСТ 16523–97. Прокат тонколистовой из углеродистой стали качественной и обыкновенного качества общего назначения. Технические условия;

ГОСТ 1050–2013. Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия;

ТУ 14-1-5391–99. Прокат фасонный из низколегированной стали для вагоностроения.

ТАБЛИЦА 2. Основные параметры вагонов-хопперов для перевозки технического углерода

Наименование параметра	Завод-изготовитель		
	ДВЗ им. «Газеты Правда», г. Днепро- дзержинск	ДВЗ им. «Газеты Правда», г. Днепро- дзержинск	ОАО «Днепрова- гонмаш», г. Днепро- дзержинск
Модель вагона	20-403	25-4001	25-4046
Технические условия	ТУ 24-5-319-74	ТУ 25-5-448-78	ТУ У 35.2-05669819- 001-2002
Грузоподъемность, т	60,0	60,0	60,0
Масса тары, т	24,0	24,0-24,7	24,4-26,5
Объем кузова, м <sup>3</sup>	130,0	146,0	146,0
Статическая осевая нагрузка, кН (тс)	205,8 (21,0)	205,8 (21,0)	209,6 (21,4)
Габарит	1-Г	1-Г	1-Г
База вагона, мм	13 370	13 370	13 280
Ширина максимальная, мм	3112	3112	3106
Длина, мм: – по осям сцепления автосцепок – по концевым балкам рамы	17 500 16 280	17 500 16 280	17 500 16 280
Высота от уровня головок рельсов (УГР), мм: – максимальная – до разгрузочных устройств	4315 230-260	4722 269	4722 300
Количество люков, шт.: – загрузочных – разгрузочных	10 8	12 8	12 8
Диаметры люка в свету, мм: – загрузочных – разгрузочных	300 390	300 390	300 622

Окончание табл. 2

Наименование параметра	Завод-изготовитель			
	ДВЗ им. «Газеты Правда», г. Днепро- дзержинск	ДВЗ им. «Газеты Правда», г. Днепро- дзержинск	ОАО «Днепрова- гонмаш», г. Днепро- дзержинск	ОАО «Ярославский ВРЗ», г. Ярославль
Модель вагона	20-403	25-4001	25-4046	19-6930
Угол наклона торцевых стенок, град.	40	40	40	40
Угол наклона бункеров, град.	40	40	40	40
Год постановки на производство	1960	1979	1989	2016
Год снятия с производства	1979	1989	–	–
Наличие переходной площадки	Нет	Нет	Нет	Нет
Наличие стояночного тормоза	Есть	Есть	Есть	Есть
Конструкционная скорость, км/ч	120	120	120	120
Модель тележки	18-100	18-100	18-100	Тип 2 по ГОСТ 9246–2013
Нормативный срок службы, лет	24	24	24	32

Пр и м е ч а н и е. ТУ 24-5-319–74. Вагон модели 20-403 для перевозки сажи;

ТУ 25-5-448–78. 4-осный вагон-хоппер для технического углерода, модель 25-4001;

ТУ У 35.2-05669819-001–2002. 4-осный вагон для технического углерода, модель 25-4046;

ТУ 3182-027-01124336–2016. Вагон-хоппер для технического углерода модель 19-6930;

ГОСТ 9246–2013. Тележки двухосные трехэлементные грузовых вагонов железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия.

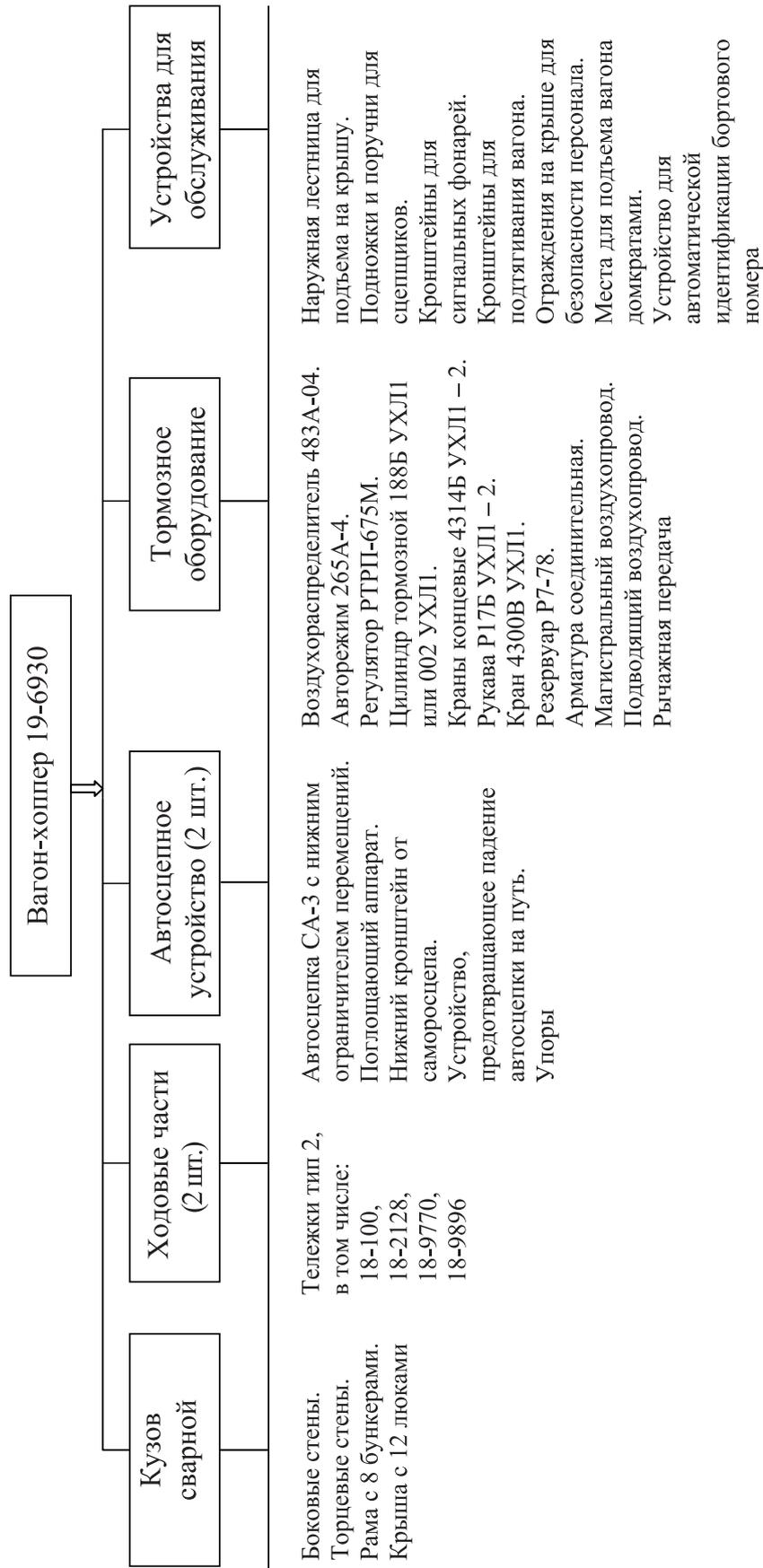


Рис. 3. Основные составные части вагона-хоппера модели 19-6930

Для оценки соответствия прочностных качеств кузова вагона требованиям нормативных документов («Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)» (далее – «Нормы...») [7] и ГОСТ 33211–2014 [8]) с использованием пакета ANSYS методом конечных элементов выполнен комплекс прочностных расчетов [9–12]. Расчетная модель вагона-хоппера модели 19-6930 приведена на рис. 4, распределение эквивалентных напряжений в вагоне при инерционных нагрузках – на рис. 5.

Наибольшие эквивалентные напряжения в металлоконструкции, полученные по указанным расчетным режимам, не превышают максимально допускаемые значения, что говорит о достаточной прочности кузова вагона-хоппера модели 19-6930 (табл. 3).

Усталостная прочность оценивалась, согласно нормативным документам [7, 8], по коэффициенту запаса сопротивления усталости по формуле

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

в которой  $\sigma_{a,N}$  – предел выносливости (по амплитуде) для контрольной зоны при симметричном цикле и установившемся режиме нагружения при базовом числе циклов  $N_0 = 10^7$ ;  $\sigma_{a,\varepsilon}$  – величина амплитуды динамического напряжения условного симметричного цикла, приведенная к базовому числу циклов  $N_0$ , эквивалентная повреждающему воздействию реального режима эксплуатационных напряжений за расчетный срок службы;  $[n]$  – минимально допустимый коэффициент запаса сопротивления усталости за выбранный срок службы.

Амплитуда динамического напряжения условного симметричного цикла  $\sigma_{a,\varepsilon}$  определяется по известным формулам «Норм...»

$$\sigma_{a,\varepsilon} = m_1 \sqrt{\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^n n_i (\sigma_{a,i})^{m_1}}$$

и ГОСТ 33211–2014 [8]

$$\sigma_{a,\varepsilon} = m_1 \sqrt{\frac{1}{N_0} \left( \sum_{i=1}^n n_i (\sigma_{a,i})^{m_1} + (\sigma_{a,N})^{m_1-m_2} \sum_{j=1}^l (\sigma_{a,j})^{m_2} \right)},$$

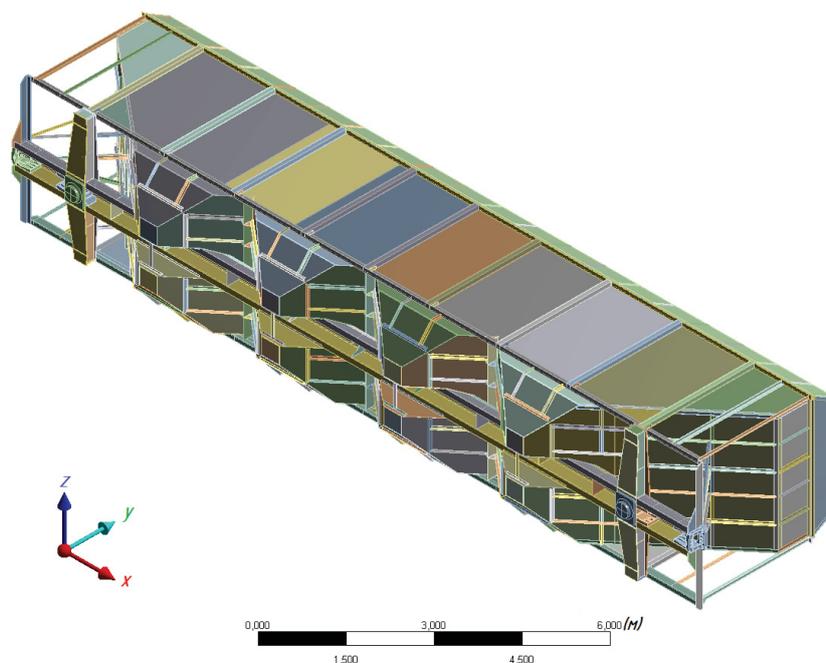


Рис. 4. Расчетная модель вагона-хоппера модели 19-6930 (вагон повернут на бок)

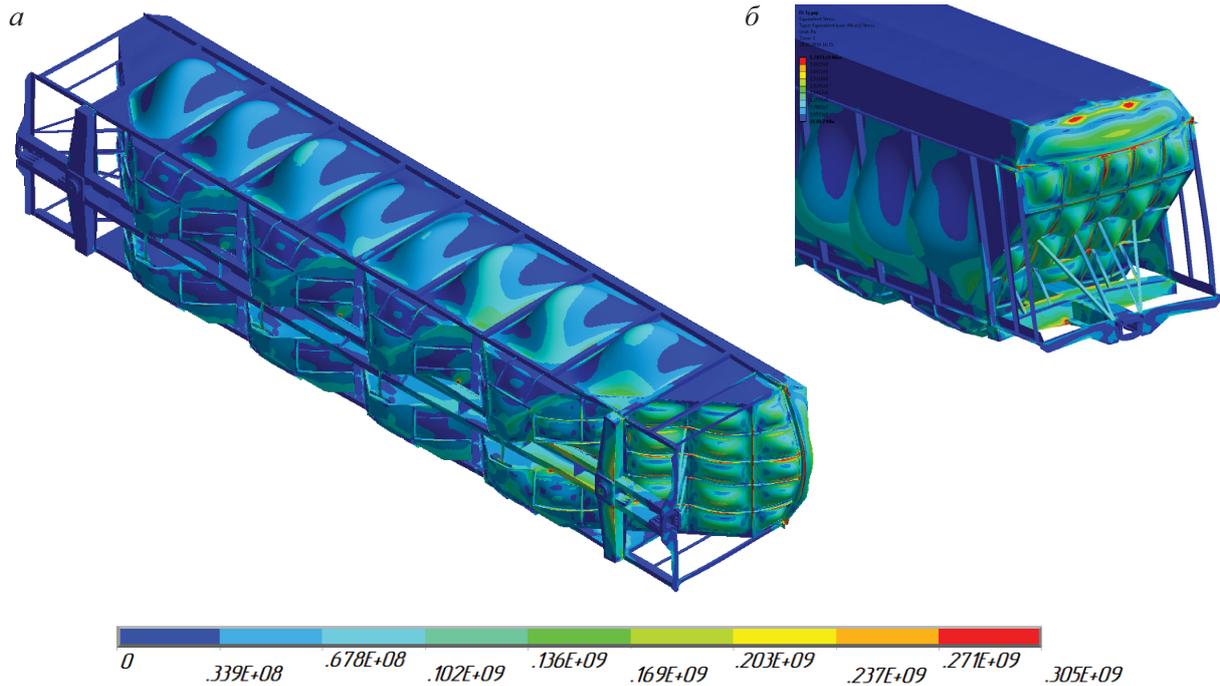


Рис. 5. Распределение эквивалентных напряжений (Па) в вагоне при инерционных нагрузках (первый режим – удар, режим 1а):

а – общий вид (вагон повернут на бок); б – торцевая стена вагона

ТАБЛИЦА 3. Результаты расчета прочности вагона-хоппера модели 19-6930

Расчетный режим		Зона, в которой получены максимальные эквивалентные напряжения в кузове	Значения эквивалентных напряжений, МПа	
			максимальное	допускаемое
Первый расчетный режим	Удар	Стойки торцевой стены	326	345
	Рывок	Хребтовая балка в концевой части	301	
	Сжатие	Хребтовая балка в зоне заделки в шкворневую	222	310,5
	Растяжение	Хребтовая балка в концевой части	278	
Третий расчетный режим	Удар	Стойки торцевой стены	191	220
	Рывок		190	
	Сжатие		129	
	Растяжение		118	
Второй расчетный режим		Концевая балка в средней части	310	327,75

где  $m$ ,  $m_1$ ,  $m_2$  – показатели степени кривой выносливости;  $\sigma_{a,i}$ ,  $\sigma_{a,j}$  – амплитуды динамического напряжения, МПа;  $n$ ,  $n_i$ ,  $n_j$  – количество циклов амплитуд динамического напряжения.

Результаты расчета на сопротивление усталости вагона-хоппера модели 19-6930 приведены в табл. 4. Условие  $n \geq [n]$  выполнялось для всех зон.

ТАБЛИЦА 4. Результаты расчета на сопротивление усталости вагона-хоппера модели 19-6930

Зона	«Нормы...»		ГОСТ 33211–2014	
	<i>n</i>	[ <i>n</i> ]	<i>n</i>	[ <i>n</i> ]
Шкворневая балка в зоне заделки в хребтовую (нижний лист)	1,84	1,8	1,73	1,5
Стойка торцевой стены	2,27	1,8	2,17	1,5
Хребтовая балка в зоне усиления у шкворневой (нижний лист)	1,87	1,8	1,81	1,5

Комплекс нормативных расчетов показал, что конструкция вагона-хоппера модели 19-6930 удовлетворяет требованиям нормативных документов [7, 8] в части прочности, усталостной прочности, а также устойчивости сжатых элементов конструкции, ходовых и динамических качеств и сцепляемости.

С целью экспериментальной проверки нормируемых показателей, в рамках работ по постановке на производство и сертификации вагона, типовыми методами [13, 14] проведен комплекс следующих испытаний:

– по определению соответствия габаритных размеров строительному очертанию и общесистемных показателей;

– на статическую прочность конструкции;  
 – на прочность при соударении;  
 – стационарные тормозные;  
 – расчетно-экспериментальная оценка сопротивления усталости конструкции;  
 – ходовые тормозные;  
 – ходовые динамические и ходовые прочностные.

По результатам проведенного комплекса испытаний (табл. 5) подтверждено соответствие вагона-хоппера модели 19-6930 требованиям нормативных документов.

Таким образом, выполненный комплекс расчетов и испытаний вагона-хоппера модели 19-6930 позволил прийти к выводу о возможности

ТАБЛИЦА 5. Значения нормируемых показателей по результатам испытаний вагона-хоппера модели 19-6930

Вид испытаний	Нормируемые показатели	Допускаемое значение
Статическая прочность конструкции, МПа	195 (хребтовая балка), 162 (нижняя обвязка кузова), 161 (шкворневая балка), 79 (бункер)	310,5 327,7 310,5 327,7
Прочность при соударении, МПа	285 (нижняя обвязка кузова), 272 (хребтовая балка), 265 (бункер), 248 (шкворневая балка)	345
Стационарные тормозные испытания: – коэффициент силы нажатия тормозных колодок композиционных при режиме: порожнем груженом – удержание груженого вагона стояночным тормозом на уклоне, %: композиционные колодки чугунные колодки	0,222 0,152 49,05 54,82	Не менее 0,22 Не менее 0,14 Не менее 30 Не менее 30

Вид испытаний	Нормируемые показатели	Допускаемое значение
Определение коэффициента запаса сопротивления усталости, исходя из назначенного срока службы вагона 32 года	1,60 (хребтовая балка) 1,74 (нижняя обвязка кузова) 2,03 (бункер) 2,25 (шкворневая балка)	Не менее 1,50
Ходовые тормозные испытания (тормозной путь), м, при режиме: порожнем груженом	732 867	Не более 890 Не более 1060
Ходовые динамические испытания: коэффициент устойчивости колеса от схода с рельсов: порожний режим: прямая 90 км/ч кривая R650 м 90 км/ч кривая R350 м 80 км/ч стрелка 40 км/ч груженный режим: прямая 90 км/ч кривая R650 м 90 км/ч кривая R350 м 80 км/ч стрелка 40 км/ч коэффициент устойчивости от опрокидывания при движении по кривым участкам пути: наружу кривой: груженный режим, кривая R650 м 120 км/ч порожний режим, кривая R650 м 120 км/ч внутри кривой: груженный режим, кривая R350 м 10 км/ч порожний режим, кривая R350 м 10 км/ч	2,18 2,13 1,75 1,86 2,67 2,39 2,19 2,01 2,68 1,73 4,19 2,32	«Нормы ...», ГОСТ 33211– 2014, Приказ МПС РФ № 41 [15]  Не менее 1,30  Не менее 1,30  Не менее 1,20

постановки на производство и сертификации данного вагона. После этого вагон был внесен в справочник моделей грузовых вагонов с разрешением курсирования по железнодорожным путям колеи 1520 мм, что свидетельствует об успешном освоении производства вагонов-хопперов для перевозки технического углерода с увеличенным сроком службы.

### Библиографический список

1. Медведев В.И. Исследование пожарной опасности и уточнение классификации технического углерода с целью установления оптимальных усло-

вий его перевозки / В.И. Медведев, В.В. Наперов // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2010. – № 5 (35). – С. 3–7.

2. Грузовые вагоны железных дорог колеи 1520 мм : альбом-справочник. 002 И-2009 ПКБ ЦВ. – Утв. Комиссией Совета по железнодорожному транспорту полномочных специалистов вагонного хозяйства железнодорожных администраций, протокол от 27–29 апреля 2010 г. – М., 2010. – 754 с.

3. Битюцкий А.А. Анализ технического состояния специализированных вагонов-хопперов / А.А. Битюцкий, Н.А. Битюцкий // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2007. – № 3. – С. 33–36.

4. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности железнодорожного подвижного

состава». ТР ТС 001/2011. – Утв. Решением Комиссии Таможенного союза от 15 июля 2011 г. № 710. – М., 2011. – 61 с.

5. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. – Введены Приказом Минтранса № 162 от 04.06.2012 г. – М. : Минтранс РФ, 2012. – 349 с.

6. ГОСТ 15150–69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. – М. : Стандартинформ, 2010. – 104 с.

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

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

9. Вагоны / под ред. Л. Д. Кузьмича. – М. : Машиностроение, 1978. – 376 с.

10. Анисимов П. С. Конструирование и расчет вагонов / П. С. Анисимов. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2011. – 689 с.

11. Шадур Л. А. Вагоны. Конструкция, теория и расчет / Л. А. Шадур, И. И. Челноков, Л. Н. Никольский и др. – М. : Транспорт, 1980. – 439 с.

12. Кякк К. В. Развитие методики системного проектирования грузовых вагонов для создания подвижного состава нового поколения / К. В. Кякк // Материалы XII Междунар. науч.-технич. конференции «Подвижной состав XXI века : идеи, требования, проекты». – СПб. : ПГУПС, 2017. – С. 15–19.

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

14. Бороненко Ю. П. Определение напряжений от собственного веса вагона методом динамического воздействия / Ю. П. Бороненко, А. Н. Смирнов, С. Н. Кузин // Материалы XI Междунар. науч.-технич. конференции «Подвижной состав XXI века : идеи, требования, проекты». – СПб. : ПГУПС, 2016. – С. 108–111.

15. Приказ МПС РФ от 12.11.2001 г. № 41 «О нормах допускаемых скоростей движения подвижного состава по железнодорожным путям колеи 1520 (1524) мм». – М. : МПС РФ, 2001.

## References

1. Medvedev V. I. & Naperov V. V. Issledovaniye pozharnoy opasnosti i utochneniye klassifikatsii tekhnicheskogo ugleroda s tseyu ustanovleniya optimalnykh usloviy yego perevozky [Fire hazard study and accurate definition of carbon classification in order to determine optimum conditions for its transportation]. *Energobezopasnost i energosberezheniye [Energy security and energy saving]*, 2010, no. 5 (35), pp. 3–7. (In Russian)

2. *Gruzoviyeh vagonov zheleznnykh dorog kolei 1520 mm [Freight cars of 1520 mm gauge railroads]*. Albom-spravochnik [Manual]. 002 И-2009 ПКВ ZhB. Utv. Komissiyey Soveta po zheleznodorozhnomu transport polnomochnnykh spetsialistov vagonnogo khozyaistva zheleznodorozhnykh administratsiy [Appr. by the Railroad Transport Council Committee of the Rolling Stock Railway Administration Competent Authority], protocol dated 27–29<sup>th</sup> April 2010. Moscow, 2010, 754 p. (In Russian)

3. Bityutskiy A. A. & Bityutskiy N. A. Analiz tekhnicheskogo sostoyaniya spetsializirovannykh vagonov-khopperov [Technical state analysis of special-purpose hopper cars]. *Vagony i vagonnoye khozyaistvo [Cars and car facilities]*, 2007, no. 3, pp. 33–36. (In Russian)

4. *Tekhnicheskyy reglament Tamozhennogo soyuza “O bezopasnosti zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava”. TR TS 001/2011 [Technical regulations of the Customs Union “On safety of the railway rolling stock”. TR CU 001/2011]*. Utv. Resheniyem Komissii Tamozhennogo soyuza [Appr. by the Customs Union Commission Decision] dated 15<sup>th</sup> July 2011, no. 710. Moscow, 2011, 61 p. (In Russian)

5. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznnykh dorog Rossiyskoy Federatsii [The Russian Federation railway operating rules]*. Vvedeny Prikazom Mintransa [Intr. by the Ministry of Transportation Order], no. 162 dated 04.06.2012. Moscow, Mintrans RF Publ., 2012, 349 p. (In Russian)

6. *GOST 15150–69. Mashiny, pribory i drugiyeh tekhnicheskyyeh izdeliya. Ispolneniya dlya razlichnykh klimaticheskykh rayonov. Kategorii, usloviya ekspluatatsii, khraneniya i transportirovaniya v chasty vozdeistviya klimaticheskykh faktorov vneshney sredy [State Standard 15150–69. Machines, instruments and other in-*

*dustrial products. Modifications for different climatic regions. Categories, operating, storage and transportation conditions as to the influence of climatic factors of the environment*]. Moscow, Standartinform Publ., 2010, 104 p. (In Russian)

7. *Normy dlya rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh)* [Norms for calculation and design of 1520 mm gauge MPS railway cars (unpowered)]. Moscow, GosNIIV–VNIIZhT [Car-Building Scientific Research Institute – All-Russian Scientific Research Institute of Railway Transport] Publ., 1996, 317 p. (In Russian)

8. *GOST 33211–2014. Vagony gruzoviye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskym kachestvam* [State Standard 33211–2014. Freight cars. Requirements to durability and dynamic qualities]. Moscow, Standartinform Publ., 2016, 54 p. (In Russian)

9. *Vagony* [Cars]. Ed. by L. D. Kuzmich. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1978, 376 p. (In Russian)

10. Anisimov P. S. *Konstruirovaniye i raschet vagonov* [Cars: design and calculation]. Moscow, Ucheb.-metod. tsentr po obrazovaniyu na zh.-d. transporte [Railway educational training center] Publ., 2011, 689 p. (In Russian)

11. Shadur L. A., Chelnokov I. I., Nikolskiy L. N. et al. *Vagony. Konstruktsiya, teoriya i raschet* [Cars. Design, theory and calculation]. Moscow, Transport Publ., 1980, 439 p. (In Russian)

12. Kyakk K. V. *Razvitiye metodiky sistemnogo proektirovaniya gruzovykh vagonov dlya sozdaniya*

*podvizhnogo sostava novogo pokoleniya* [The development of system engineering procedure for freight cars to construct the new generation rolling stock]. *Materialy XII Mezhdunar. nauch.-tekhnich. konferentsii “Podvizhnoy sostav XXI veka”* [Proceedings of the 12<sup>th</sup> International research and engineering conference “The 21<sup>st</sup> century rolling stock: ideas, regulations, projects”]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2017, pp. 15–19. (In Russian)

13. Anisimov P. S. *Ispytaniya vagonov* [Car tests]. Moscow, Marshrut Publ., 2004, 197 p. (In Russian)

14. Boronenko Yu. P., Smirnov A. N. & Kuzin S. N. *Opredeleniye napryazheniy ot sobstvennogo vesa vagona metodom dinamicheskogo vozdeistviya* [Stress calculation from dead weight by means of dynamic influence procedure]. *Materialy XI Mezhdunar. nauch.-tekhnich. konferentsii “Podvizhnoy sostav XXI veka”* [Proceedings of the 11<sup>th</sup> International research and engineering conference “The 21<sup>st</sup> century rolling stock: ideas, regulations, projects”]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2016, pp. 108–111. (In Russian)

15. *Prikaz MPS RF ot 12.11.2001 g. no. 41 “O normakh dopuskayemykh skorostey dvizheniya podvizhnogo sostava po zheleznodorozhnym putyam kolei 1520 (1524) mm”* [The RF Ministry of Transportation order dated 12.11.2001 no. 41 “On the norms of the rolling stock speed limit for 1520 (1524) mm gauge railways”]. Moscow, MPS RF [The Russian Federation Ministry of Transportation] Publ., 2001. (In Russian)

АФАНАСЬЕВ Евгений Владимирович – канд. техн. наук, руководитель испытательного центра продукции вагоностроения, aev@engcenter.ru (ООО «Инженерный Центр подвижного состава»); БИТЮЦКИЙ Никита Андреевич – канд. техн. наук, технический директор, bna@engcenter.ru (ООО «Экспертный Центр подвижного состава»); ЦЫГАНСКАЯ Людмила Валериевна – канд. техн. наук, доцент, tcyganskaya@gmail.com (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); ИСПОЛОВА Екатерина Алексеевна – начальник отдела расчетов научно-исследовательского бюро, katie-kat@mail.ru; \*ФИЛИППОВА Ирина Олеговна – младший научный сотрудник научно-исследовательского бюро, filippova.io@yandex.ru (АО «Научно-внедренческий центр “Вагоны”»).

УДК 621.331.3.024

**И. А. Баева****МЕТОДИКА РАСЧЕТА СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
ПОСТОЯННОГО ТОКА 3,0 КВ ПРИ ВВЕДЕНИИ УСТРОЙСТВ  
РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ**

Дата поступления: 04.12.2018

Решение о публикации: 21.01.2019

**Аннотация**

**Цель:** Разработка методики проведения электрического расчета системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ с введением устройств регулирования напряжения. **Методы:** Моделирование системы тягового электроснабжения осуществляется для двух режимов: I – с естественными внешними характеристиками  $U_{xx} = 3500$  В; II – с введением устройств регулирования  $U_{cr} = 3500$  и 3700 В. Для решения задачи применялись методы теории последовательных приближений, систем автоматического регулирования, тягового электроснабжения, методы математического моделирования и теории вероятности. При математическом моделировании использовался программный комплекс расчетов тягового электроснабжения (КОРТЭС). **Результаты:** Предложен алгоритм электрического расчета системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ с введением устройств регулирования напряжения с оценкой уровня напряжения на токоприемнике электровоза  $U_{\rho}$  на примере расчета электрифицированного на постоянном токе 3,0 кВ участка Южно-Уральской железной дороги. Приведены сравнительные уточненные оценки расхода электрической энергии на тягу, потерь электрической энергии в тяговой сети и трансформаторах тяговых подстанций без устройств и с устройствами стабилизации напряжения на тяговых подстанциях. **Практическая значимость:** Разработанный алгоритм в составе программного комплекса КОРТЭС направлен на получение достоверных результатов электрического расчета системы тягового электроснабжения при определении ряда эксплуатационно-технических задач (пропускной способности, межпоездного интервала, усиления системы тягового электроснабжения, температурного режима устройств системы тягового электроснабжения и др.). Описанная методика проведения электрических расчетов системы тягового электроснабжения используется в учебном процессе на кафедре «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения.

**Ключевые слова:** Электрифицированные участки, постоянный ток, электровозы, расчетный комплекс тягового электроснабжения КОРТЭС, методика расчета, пропускная способность, регулирование напряжения.

**Irina A. Baeva**, postgraduate student, IBaeva@usurt.ru (Ural State University of Railway Transport) CALCULATING PROCEDURE FOR THE SYSTEM OF TRACTION POWER SUPPLY OF DC 3,0 kV IN CASE OF APPLYING VOLTAGE REGULATING DEVICES. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-1-51-58

**Summary**

**Objective:** To develop the electric calculation procedure for the system of 3,0 kV DC traction power supply while introducing voltage regulating devices. **Methods:** Modeling of the traction power supply system is carried out for two modes: I – with natural characteristics  $U_{xx} = 3500$  V; II – the mode with voltage regulation devices  $U_{cr} = 3500$  and 3700 V. The methods of successive approximations theory, automatic control system, traction energy, mathematical model approach as well as the theory of probability were applied for the solution of the task. Software package of traction energy calculations (KORTES) was used for mathematical modeling. **Results:** An algorithm of electric calculation was introduced for the system of traction power supply of 3,0 kV DC with application of voltage regulating devices including volt-

age level assessment across the collector of the  $U_c$  electric rolling stock. The algorithm in question was demonstrated by the example of electrified 3,0 kV DC section of the South-Ural railroad. Comparative amended estimates of electric energy consumption on traction were conducted, as well as electric power dissipation in the electric traction network and boosters of railway substations with or without voltage regulating. **Practical importance:** The elaborated algorithm being a part of KORTES software package is aimed at getting consistent results of electric calculations of the traction energy system in case of determining a number of maintenance tasks (train-handling capacity, train interval, traction energy system enhancement, temperature condition of the traction energy system facilities, etc.). The above-described procedure on conducting electric calculations of the traction energy system is used in teaching and learning process at the chair of “Transport electric power supply” at the Ural State Transport University.

**Keywords:** Electrified sections, direct current, electric locomotives, settlement design power supply complex “KORTES”, train speed, throughput, voltage regulation.

Определение ограничений пропускной способности участков контактной сети, электрифицированных на постоянном токе 3,0 кВ, по устройствам системы тягового электроснабжения (СТЭ) производится в результате электрических расчетов системы.

На рис. 1 представлены существующие методы расчета СТЭ [1–8]. Работа СТЭ электрифицированного участка происходит при большом числе производственно-технических и эксплуатационных факторов, многие из которых имеют случайный характер [6]. Анали-

тическое описание связей между отдельными факторами затруднено. Среди существующих методов расчета СТЭ имитационное моделирование наиболее полно отражает взаимодействие этих факторов и представляет наиболее приемлемый путь исследования СТЭ при организации движения грузовых соединенных поездов и поездов повышенной массы [5, 9].

Для анализа пропускной способности СТЭ постоянного тока 3,0 кВ при пропуске грузовых поездов повышенной массы и соединенных грузовых поездов в ОАО «РЖД» исполь-



Рис. 1. Методы расчета СТЭ

зуется программный комплекс расчетов ТЭС (КОРТЭС), основанный на имитационном моделировании СТЭ и позволяющий создать модель и получить результаты работы реального участка железной дороги без экспериментальных исследований (рис. 2).

При проведении вариантных электрических расчетов СТЭ в программе КОРТЭС с устройствами регулирования напряжения (системы бесконтактного автоматического регулирования напряжения (БАРН), вольтодобавочных устройств [10]) произведено дополнение существующей методики расчета [4, 11, 12], основанное на применении поправочных токовых коэффициентов  $KI_{ст}$  и позволяющего уточнить электрические расчеты СТЭ. Поправочные токовые коэффициенты получены в процессе электрического расчета СТЭ с использованием метода последовательных приближений [13].

Дополненная методика расчета СТЭ представлена в виде алгоритма на рис. 3 из 15 функциональных блоков.

В блок 1 вводятся данные, необходимые для проведения электрических расчетов СТЭ, к ним относятся:

- общая характеристика участка (длина станций, их название и пикетаж);

- данные для выполнения тяговых расчетов (профиль пути, характеристики ЭПС, составов и масса состава);

- данные, необходимые для моделирования графика движения поездов (размеры движения для различных типов поездов, массы грузовых поездов, допустимые минимальные межпоездные интервалы);

- сведения о параметрах СТЭ и режиме работы оборудования.

Тяговые расчеты  $I_3 = f(S)$  блоком 2 осуществляются для четного и нечетного путей.

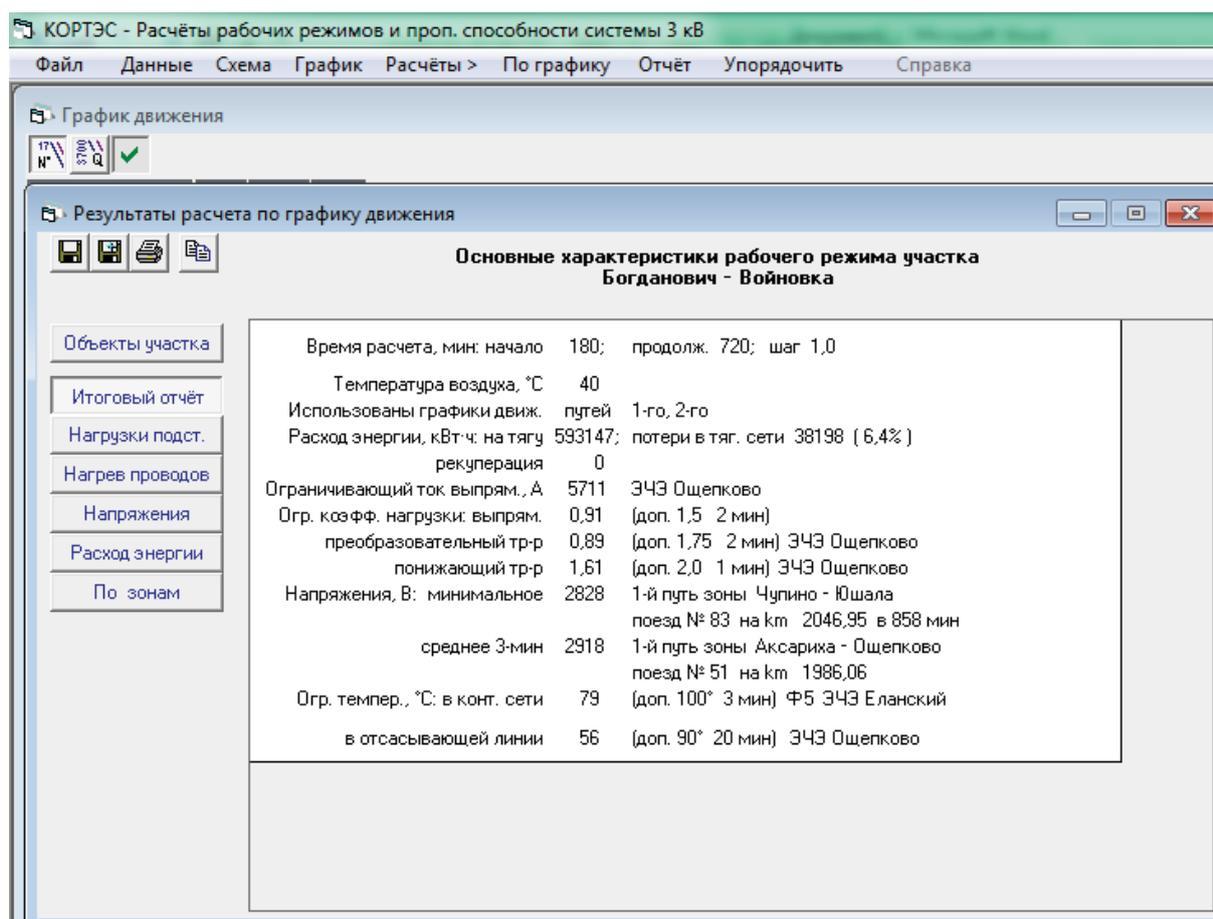


Рис. 2. Фрагмент результатов электрических расчетов СТЭ в программе КОРТЭС

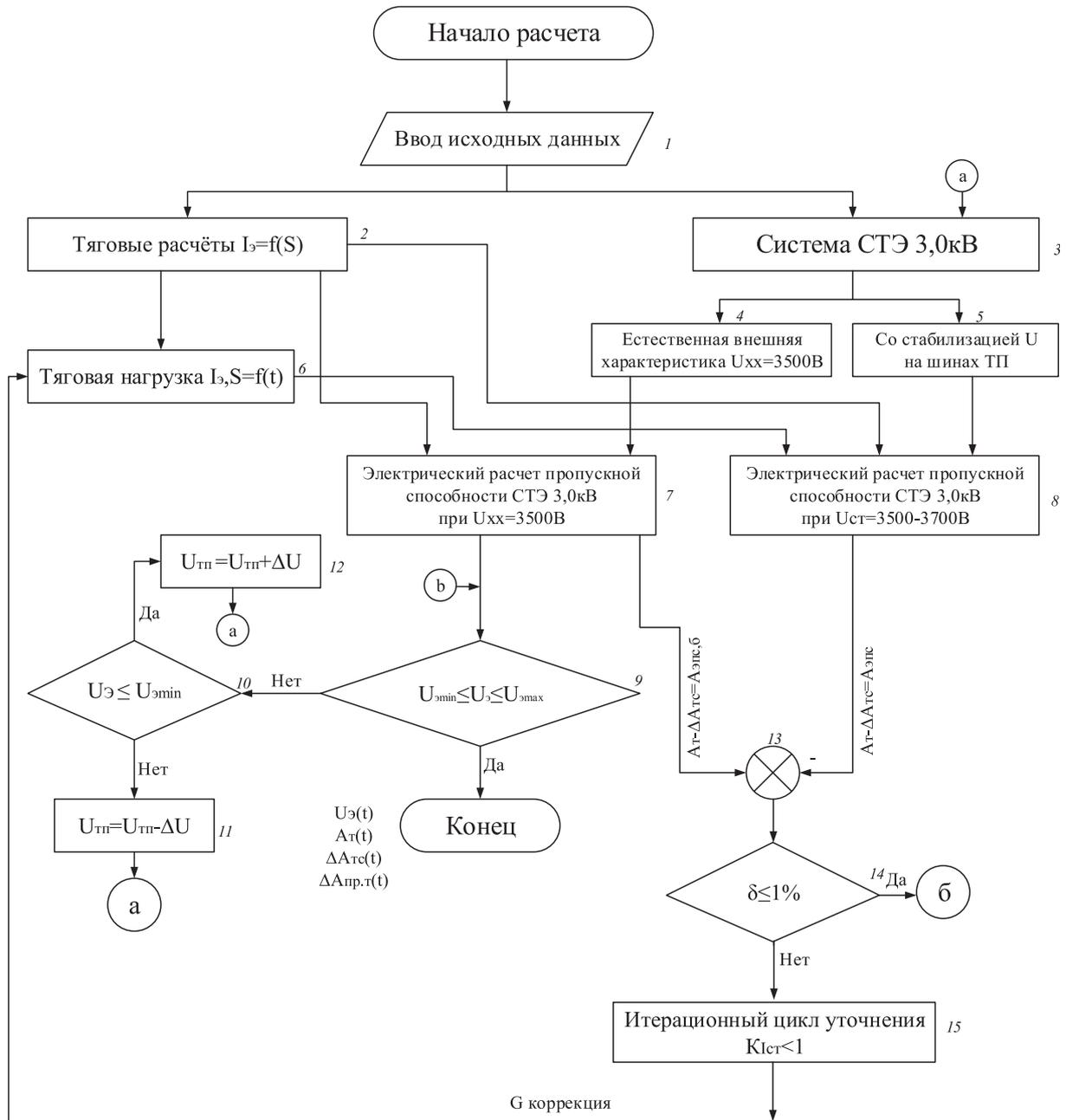


Рис. 3. Алгоритм расчета СТЭ постоянного тока 3,0 кВ с введением устройств регулирования напряжения:

Блок: 1 – исходные данные; 2 – предназначен для выполнения тяговых расчетов; 3 – формирование схем, используемых при электрических расчетах СТЭ 3,0 кВ; 4 –  $U_{xx} = 3500\text{ В}$  (естественные характеристики при отсутствии устройств регулирования напряжения), режим I; 5 –  $U_{ст} = 3500-3700\text{ В}$  (стабилизированные характеристики с устройствами регулирования напряжения), режим II; 6 – редактор тяговой нагрузки; 7, 8 – выполнение электрических расчетов для режимов I и II; 9 – проверка условия  $U_{3, \min} \leq U_3 \leq U_{3, \max}$ ; 10 – проверка условия  $U_3 \leq U_{3, \min}$ ; 11, 12 – производится снижение или увеличение уровня напряжения на шинах тяговых подстанций (ТП) и переход в блок 5; 13 – сравнение величин между принятым базовым расходом электрической энергии по счетчикам электроподвижного состава (ЭПС)  $A_{элс.б}$  и полученным расходом электрической энергии (ЭЭ) с введением устройств регулирования напряжения  $A_{элс}$ ; 14 – выполнение итерационного цикла уточнения  $K_{I_{ст}} < 1$ ; 15 – определение погрешности расчета  $A_{элс.б}$  и  $A_{элс} \delta \leq 1$

Они выполняются с остановкой или без нее на станции. Возможно использование тяговых расчетов по данным опытных поездок.

В результате расчетов имеем зависимости [10]

$$I_{эi}, V_i = f(Q_i, i_{i\%}, U_{эi}),$$

где  $Q_i$  – массы поездов, т;  $i_{i\%}$  – уклоны пути, ‰;  $U_{эi}$  – напряжение на электровозе, В;  $V_i$  – скорость движения поездов, км/ч.

Моделирование СТЭ осуществляется для двух режимов: I – с естественными внешними характеристиками тяговых подстанций (ТП) с напряжением холостого хода преобразовательных агрегатов  $U_{xx} = 3500$  и  $3600$  В; II – с введением устройств регулирования напряжения системой БАРН на уровне  $U_{ст} = 3500, 3600$  и  $3700$  В.

После выполнения электрических расчетов пропускной способности СТЭ в режиме I (блок 7) проверяется условие (блок 9)  $U_{э, \min} \leq U_{э} \leq U_{э, \max}$ . Если оно выполняется, то выдается информация о результатах электрических расчетов (расход электрической энергии на тягу  $A_{т}$ , потери ЭЭ в тяговой сети  $\Delta A_{тс}$  и трансформаторах  $\Delta A_{тр}$  ( $\Delta A_{тр, \text{нагр}} + \Delta A_{тр, \text{xx}}$ )), если нет, то изменяется напряжение на шинах ТП с шагом  $\Delta U$  (блоки 11, 12) и производятся электрические расчеты пропускной способности СТЭ в режиме II (блок 8).

В методику (рис. 3) введен элемент сравнения 13, определяющий разницу между  $A_{эпс, б}$  и  $A_{эпс}$  с заданной погрешностью  $\delta$  (например, не более 1 ‰). Если погрешность  $\delta \leq 1$  (блок 14), то производится проверка условия 9, если нет, то выполняется итерационный цикл уточнения (блок 15), основанный на методе последовательных приближений [13].

Расход ЭЭ  $A_{эпс, б}$  определяется после проведения электрических расчетов пропускной способности СТЭ при работе ТП участка по внешним естественным характеристикам с напряжением холостого хода  $U_{xx} = 3500$  В (режим I) по формуле

$$A_{эпс} = A_{т} - \Delta A_{тс}.$$

Расход ЭЭ  $A_{эпс}$  – после электрических расчетов СТЭ в режиме II.

Коррекция  $G$  токов электровоза  $I_{э}$ , полученных из тягового расчета при  $U_{э} = 3000$  В, осуществляется в блоке 6 с использованием токоограничивающих коэффициентов  $K_{I_{ст}} < 1$ , определенных в ходе выполнения итерационных циклов уточнения (блок 15).

При повышении (стабилизации) напряжения на шинах ТП производится электрический расчет двух режимов работы СТЭ: в режиме I (без токоограничивающих коэффициентов) происходит увеличение скорости движения поездов (рост пропускной способности); режим II с введением поправочных токовых коэффициентов  $K_{I_{ст}}$  предусматривает сохранение пропускной способности, т. е. сохранение скорости движения поездов [11].

В электрических расчетах в режиме I при повышении напряжения на токоприемнике ЭПС и сохранении токов электровоза  $I_{э}$  увеличиваются расход ЭЭ на тягу ЭПС  $A_{эпс}$  и потери ЭЭ в тяговой сети  $\Delta A_{тс}$  и трансформаторах  $\Delta A_{тр}$  ( $K_{I_{ст}} = 1$ ). В режиме II для сохранения расхода ЭЭ  $A_{эпс}$ , снижения потерь ЭЭ  $\Delta A_{тс}$  и  $\Delta A_{тр}$  при возрастании напряжения необходимо уменьшать токи электровоза  $I_{э}$  ( $K_{I_{ст}} < 1$ ).

В таблице приведены результаты электрического расчета СТЭ постоянного тока 3,0 кВ с применением разработанной методики при скорости движения 100 км/ч при организации маршрутов движения двух одиночных грузовых поездов (ОП) с межпоездным интервалом 10 мин. Локомотивы 2хВЛ10. Также в таблице представлены два режима работы СТЭ.

Электрический расчет СТЭ со стабилизацией напряжения на ТП на уровне 3500 и 3700 В (см. таблицу) произведен по разработанной методике с введением поправочных токовых коэффициентов  $K_{I_{ст}} < 1$  и направлен на получение уточненных технико-энергетических показателей системы, при сохранении практически одинакового расхода ЭЭ на тягу по электрическим счетчикам электровозов  $A_{эпс}$  без регулирования (34 597 кВт·ч) и со стабилизацией напряжения на ТП (34 509 и 34 489 кВт·ч). Из этого следует, что при со-

Результаты электрического расчета СТЭ

Режимы работы СТЭ при повышении напряжения на токоприемниках ЭПС	Напряжение ТП, $U_{др}$ кВ	Поправочные токовые коэффициенты, $K_I$		Расход ЭЭ на тягу $A_T = A_{эпс} + \Delta A_{тс}$ кВт·ч	Потери ЭЭ в тяговой сети, $\Delta A_{тс}$ кВт·ч	Расход ЭЭ в ЭПС, $A_{эпс}$ кВт·ч	$\Delta A_{тс} / A_T \cdot 100, \%$	Потери ЭЭ в трансформаторах, $\Delta A_{тр \text{ напр} / \text{хх}}$ кВт·ч	Расход ЭЭ на тягу ТП, $A_m = A_T + \Delta A_{тр}$ кВт·ч	Количество МПЗ менее 2700 В, шт.
		хх	ст							
Повышение скорости движения	3,5 хх	1		37839	3242	34597	8,6	170/2470	40479	–
	3,5 ст		1	39200	3041	36159	7,8	258/2705	42164	–
Сохранение скорости движения	3,7 ст		1	41422	3046	38376	7,4	270/2705	44397	–
	3,5 ст		0,95	37254	2745	34509	7,4	231/2705	40190	–
	3,7 ст		0,89	36901	2412	34489	6,5	213/2705	39819	–

хранении постоянной скорости движения поездов (пропускной способности) введение стабилизации напряжения на шинах ТП на уровне 3500 и 3700 В приводит к снижению потерь электрической энергии в тяговой сети  $\Delta A_{тс}$  на 15 и 25% и соответственно к уменьшению расхода ЭЭ на тягу на ТП  $A_{ТП}$  на 0,7 и 1,6% (с 40479 до 40190 и 39819 кВт·ч).

Вместе с тем электрический расчет СТЭ по существующей методике в программе КОРТЭС, произведенный при повышении (стабилизации) напряжения на ТП на уровне 3500 и 3700 В, ведет к увеличению скорости движения поездов (пропускной способности) с соответствующим ростом расхода ЭЭ на тягу на ТП на 4 и 9% (с 40479 до 42164 и 44397 кВт·ч) (см. таблицу).

Проведенная работа позволила прийти к следующим выводам:

1) в дополнение к программному комплексу КОРТЭС разработан алгоритм расчета СТЭ постоянного тока 3,0 кВ с устройствами повышения (стабилизации) напряжения на ТП;

2) получены сравнительные уточненные оценки расхода ЭЭ на тягу, потерь ЭЭ в тяговой сети и трансформаторах ТП без устройств стабилизации напряжения на ТП и с ними;

3) разработанный алгоритм в составе программного комплекса КОРТЭС направлен на получение достоверных результатов электрического расчета СТЭ при определении ряда эксплуатационно-технических задач (пропускной способности, межпоездного интервала, усиления СТЭ, температурного режима устройств СТЭ и др.).

### Библиографический список

1. Баева И. А. Обзор методов электрического расчета системы тягового электроснабжения постоянного тока / И. А. Баева // Инновационный транспорт. – 2017. – № 4 (26). – С. 58–64.

2. Андреев В. В. Развитие методологии расчета систем тягового электроснабжения / В. В. Андреев, В. А. Гречишников, Ю. Н. Король, М. В. Шевлю-

гин // Железнодорожный транспорт. – 2014. – № 8. – С. 32–34.

3. Сердинов С. М. Развитие методов расчета устройств электроснабжения / С. М. Сердинов // Железнодорожный транспорт. – 1981. – № 9. – С. 44–50.

4. Аржанников Б. А. Тяговое электроснабжение постоянного тока скоростного и тяжеловесного движения поездов : монография / Б. А. Аржанников. – Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2012. – 207 с.

5. Тер-Оганов Э. В. Применение имитационного моделирования для расчета и анализа работы системы электроснабжения : учеб. пособие / Э. В. Тер-Оганов ; Министерство путей сообщения РФ, Урал. электромеханич. ин-т инженеров ж.-д. транспорта. – Екатеринбург : [б. и.], 1993. – 106 с.

6. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – М. : Транспорт, 1982. – 528 с.

7. Марквардт Г. Г. Применение теории вероятностей и вычислительной техники в системе энергоснабжения / Г. Г. Марквардт. – М. : Транспорт, 1972. – 224 с.

8. Аржанников Б. А. Совершенствование системы электроснабжения постоянного тока на основе автоматического регулирования напряжения тяговых подстанций : дис. д-ра техн. наук, специальность : 05.22.09 / Б. А. Аржанников. – Свердловск : УрГУПС, 1991. – 432 с.

9. Тер-Оганов Э. В. Моделирование работы системы электроснабжения электрифицированной железной дороги : конспект лекций для студентов специализации 1904.01 «Электроснабжение электрифицированных железных дорог» / Э. В. Тер-Оганов. – Екатеринбург : УрГУПС, 2007. – 83 с.

10. Аржанников Б. А. Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока : монография / Б. А. Аржанников. – Екатеринбург : УрГУПС, 2010. – 176 с.

11. Аржанников Б. А. Влияние регулирования напряжения на пропускную способность электрифицированных участков постоянного тока и на расход электрической энергии на тягу поездов / Б. А. Аржанников, И. А. Баева // Транспорт Урала. – 2017. – № 4 (55). – С. 71–75.

12. Аржанников Б. А. Концепция усиления системы тягового электроснабжения постоянного тока

3,0 кВ : монография / Б. А. Аржанников, И. О. Набойченко. – Екатеринбург : УрГУПС, 2015. – 258 с.

13. Виленкин Н. Я. Метод последовательных приближений / Н. Я. Виленкин. – М. : Наука, 1968. – 108 с. – (Сер. Популярные лекции по математике)

## References

1. Baeva I. A. Obzor metodov elektricheskogo rascheta sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka [A survey on electric power calculation of the DC traction energy system]. *Innovatsionnyj Transport [Innovative transport]*, 2017, no. 4 (26), pp. 58–64. (In Russian)

2. Andreev V. V., Grechishnikov V. A., Korol Ju. N. & Shevljugin M. V. Razvitie metodologii rascheta sistem tjagovogo elektrosnabzhenija [The development of computational strategy for traction energy systems]. *Zheleznodorozhnyj Transport [Railroad transport]*, 2014, no. 8, pp. 32–34. (In Russian)

3. Serdinov S. M. Razvitie metodov rascheta ustrojstv elektrosnabzhenija [The development of design methods for electric power supply facilities]. *Zheleznodorozhnyj Transport [Railroad transport]*, 1981, no. 9, pp. 44–50. (In Russian)

4. Arzhannikov B. A. *Tyagovoe elektrosnabzhenie postojannogo toka skorostnogo i tyazhelovesnogo dvizhenija poezdov [Traction DC power supply of high-speed and heavy-load railway traffic]*. Monograph. Yekaterinburg, Ural State University of Railway Transport Publ., 2012, 207 p. (In Russian)

5. Ter-Oganov E. V. *Primeneniye imitatsionnogo modelirovaniya dlja rascheta i analiza raboty sistemy elektrosnabzhenija [Application of simulation modeling for calculation and analysis of operation of the electric power supply system]*. Tutorial. The RF Ministry of Railways. Yekaterinburg, [b. i.], 1993, 106 p. (In Russian)

6. Markvardt K. G. *Elektrosnabzheniye elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Electric power supply for electrified railways]*. Moscow, Transport Publ., 1982, 528 p. (In Russian)

7. Markvardt G. G. *Primeneniye teorii verojatnostej i vychislitelnoj tekhniki v sisteme energosnabzhenija [Application of probability theory and computer engineering in the system of electric power supply]*. Moscow, Transport Publ., 1972, 224 p. (In Russian)

8. Arzhannikov B.A. *Sovershenstvovanie sistemy elektrosnabzhenija postojannogo toka na osnove avtomaticheskogo regulirovanija naprjazhenija tjagovyh podstantsij* [The improvement of the direct-current electric power supply system based on automatic voltage control of railway substations]. Dis. D. Eng. Sci., speciality: 05.22.09. Sverdlovsk, Ural State University of Railway Transport Publ., 1991, 432 p. (In Russian)
9. Ter-Oganov E. V. *Modelirovaniye raboty sistemy elektrosnabzhenija elektrifitsirovannoj zheleznoj dorogi* [Modeling of electric power supply system operation for electrified railways]. Yekaterinburg, Ural State University of Railway Transport Publ., 2007, 83 p. (In Russian)
10. Arzhannikov B. A. *Sistema upravlyaemogo elektrosnabzhenija elektrifitsirovannyh zheleznyh dorog postojannogo toka* [The system of controlled electric power supply of the DC electrified railways]. Monograph. Yekaterinburg, Ural State University of Railway Transport Publ., 2010, 176 p. (In Russian)
11. Arzhannikov B.A. & Baeva I.A. Vlijaniye regulirovanija naprjazhenija na propusknuju sposobnost elektrifitsirovannyh uchastkov postojannogo toka i na raskhod elektricheskoy energii na tjagu poezdov [The influence of voltage regulation on transmission capacity of electrified direct-current sections and hauling operations electric power consumption]. *Transport Urala* [The Urals transport], 2017, no. 4 (55), pp. 71–75. (In Russian)
12. Arzhannikov B.A. & Naboichenko I.O. *Kontseptsiya usileniya sistemy tiagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka 3,0 kV* [The concept of strengthening the system of DC traction power supply of 3.0 kV]. Monograph. Yekaterinburg, Ural State University of Railway Transport Publ., 2015, 258 p. (In Russian)
13. Vilenkin N. Ya. *Metod posledovatelnykh priblizheniy* [The method of successive approximations]. Moscow, Nauka Publ., 1968, 108 p. (Series of popular lectures in mathematics) (In Russian)

БАЕВА Ирина Анатольевна – аспирант, IБаева@usurt.ru (Уральский государственный университет путей сообщения).

УДК 621.873.2/.3

**Я. С. Ватулин, Д. А. Потахов****МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ  
ОПОРНОГО КОНТУРА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ГРУЗОПОДЪЕМНОГО  
КРАНА С ГРУНТОВОЙ ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ**

Дата поступления: 14.10.2018

Решение о публикации: 06.02.2019

**Аннотация**

**Цель:** Создание комбинированной численной модели железнодорожного крана и реологической модели грунта с последующим динамическим анализом системы «грузоподъемный кран–грунт». **Методы:** Применяются методы численного моделирования в функционале Simulation (метод конечных элементов) и Motion (построение системы дифференциальных уравнений движения с последующим решением путем их интегрирования) программного комплекса SolidWorks. Численная модель системы «грузоподъемный кран–грунт» настраивается согласно теориям теоретической механики и механики грунтов (нелинейно-деформируемая модель С. Н. Клепикова, упруголинейная динамическая модель грунта). **Результаты:** Разработана пространственная расчетная динамическая модель, отражающая физическую картину деформирования системы «грузоподъемный кран–шпальная выкладка–грунт». Установлен характер взаимодействия элементов опорного контура железнодорожного грузоподъемного крана с грунтовой опорной поверхностью в динамическом режиме нагружения. Определено напряженно-деформированное состояние земляного полотна участка железнодорожного пути в процессе работы железнодорожного крана, опирание которого происходит на бровку и обочину земляного полотна. **Практическая значимость:** Результаты исследований позволят обеспечить нормальную эксплуатацию, предотвратить аварийные ситуации и повысить уровень безопасности эксплуатации грузоподъемных машин на железнодорожном ходу; при этом их можно применить ко всем типам свободностоящих грузоподъемных средств.

**Ключевые слова:** Железнодорожный кран, численное моделирование, реологическая модель грунта.

**Yan S. Vatulin**, Cand. Eng. Sci., associate professor, yan-roos@yandex.ru; **\*Denis A. Potakhov**, post-graduate student, Schan-di@mail.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) INTERACTION MODELING OF THE SUPPORT CIRCUIT ELEMENTS OF THE RAILWAY LOAD-CARGO CRANE WITH GROUND SUPPORT SURFACE. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-1-59-67

**Summary**

**Objective:** To create a combined numerical model of a railway crane and a rheological model of soil with the subsequent dynamic analysis of the system “crane–soil”. **Methods:** The methods of numerical simulation in the Simulation functional (finite element method) and Motion (construction of a system of differential equations of motion with subsequent solution by integrating them) of the SolidWorks software are used. The numerical model of the system “crane–soil” is adjusted according to the theories of theoretical mechanics and soil mechanics (S. N. Klepikov’s nonlinearly deformable model, an elastic-linear dynamic model of soil). **Results:** A spatial calculation dynamic model was developed. It

reflects the physical picture of deformation of the system “crane–sleeper layout–soil”. The nature of the elements interaction of the railway crane support contour with ground bearing surface in the dynamic loading mode was established. The stress-strain state of the roadbed of the railway track section during the operation of the railway crane, supported at the curb and the roadbed side, was determined. **Practical importance:** The research results will make it possible to provide the normal operation, prevent emergencies and improve the safety level of the load-lifting machines on the railway track. Moreover, the results in question may be transferred to all types of freestanding lifting equipment.

**Keywords:** Railway crane, numerical modeling, rheological model of soil.

## Введение

Реакции опор грузоподъемного крана зависят от многих факторов и могут быть определены по методикам, изложенным в [1, 2]. Однако в случае податливости грунтового основания и вдавливания опорных элементов в грунт изменяется и величина реакции выносной опоры. Кроме того, в процессе вращения крановой установки при разгрузке опоры происходит частичное восстановление осадки [3], что не отражено ни в одной из существующих расчетных схем грузоподъемных кранов.

Осадка грунта, с одной стороны, зависит от величины приложенной нагрузки (реакция опор крана), с другой, – она оказывает влияние на ту же нагрузку.

Одной из особенностей работы железнодорожного крана является опирание грузоподъемной машины на специальные элементы – шпальные выкладки (клетки), которые устанавливаются на бровке железнодорожного пути и в значительной степени влияют на устойчивость и ресурс несущих элементов крана. С целью выявления характера взаимодействия элементов опорного контура железнодорожного грузоподъемного крана с грунтовой опорной поверхностью проводятся виртуальные эксперименты и исследования на численной модели. Компьютерное моделирование осуществляется в среде специализированного функционала Simulation (метод конечных элементов) и Motion (построение системы дифференциальных уравнений движения с последующим решением путем их интегрирования) программного комплекса SolidWorks [4, 5].

## Создание численной модели железнодорожного крана

Модель железнодорожного крана Сокол 80.01 представлена на рис. 1, а. Адекватность численной модели определяется геометрическим соответствием конструктивной структуры деталей и узлов грузоподъемного крана, точностью воспроизведения условий взаимодействия элементов между собой, при этом механизмы условно учтены сосредоточенными массами, элементы металлоконструкции, не оказывающие значимое влияние, исключены.

С целью учета собственной изгибающей деформации телескопической стрелы в систему вводится особый элемент – «фиктивный шарнир». Настройка его параметров осуществляется по результатам перемещения оголовка стрелы, полученных в функционале Simulation при статических испытаниях и частотных исследованиях. Подробное описание и настройка подобного настраиваемого элемента рассмотрены в работе [6].

С целью учета физико-механических свойств подстилающей опорной поверхности и выявления характера контакта аутригеров со шпальными клетями и шпальных клетей с опорой в расчетную область вводятся реологическая модель грунта и модель шпальной клетки.

## Реологическая модель шпальной выкладки

Жесткость шпальной клетки находится в результате статического анализа податливости

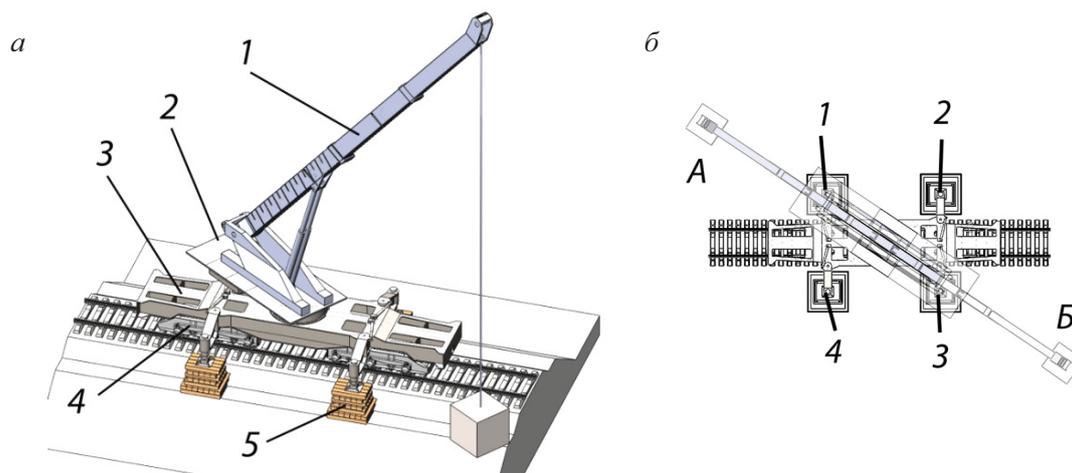


Рис. 1. Модель железнодорожного крана Сокол 80.01 в программном комплексе САПР SolidWorks (а) и фазы поворота крана на 180° из положения А в положение В по часовой стрелке (б):

а: 1 – телескопическая стрела, 2 – поворотная платформа, 3 – подкрановая платформа, 4 – ходовая тележка, 5 – шпальная клеть; б: 1–4 – выносные опоры

шпальной выкладки в функционале Simulation программного комплекса SolidWorks путем определения пространственных перемещений контрольных точек клетки [4].

Поскольку концепция функционала Motion рассматривает кинематические группы в виде жестких взаимодействий элементов между собой, шпальная клеть представлена двумя элементами, между которыми расположен сферический шарнир. Один из элементов имеет контакт с грунтом, другой – вязкоупругую связь в двух плоскостях посредством моделей Кельвина–Фойгта (вязкий элемент (демпфер), соединенный параллельно с упругой пружиной). Параметры элементов моделей Кельвина–Фойгта соответствуют жесткости шпальной клетки в заданных направлениях.

### Реологическая модель грунта

В качестве основы математической модели грунта для описания поведения основания при нагружении применяются:

– нелинейно-деформируемая модель С. Н. Клепикова для определения вертикального перемещения под действием циклической нагрузки [3];

– упруголинейная динамическая модель грунта для нахождения углового перемещения от моментной нагрузки и горизонтального перемещения от касательной нагрузки [7, 8].

Поскольку при циклическом нагружении, состоящем из процессов нагрузки и разгрузки, в грунте возникают как чисто упругие, так и остаточные (необратимые) деформации, с целью определения вертикальных перемещений используется нелинейно-деформируемая модель С. Н. Клепикова [3, 9]. Повторные нагружения и разгрузки фундамента изображаются кривой с петлями гистерезиса [3]. В расчетной модели принято допущение: разгрузка и последующее нагружение идут по одной и той же прямой линии.

Согласно [3], полная осадка грунта ( $s$ ) состоит из упругой осадки ( $s_{el}$ ), восстанавливающейся после снятия нагрузки, и остаточной (пластической) осадки ( $s_{pl}$ ), которая в большинстве случаев превышает упругую составляющую:

$$s = s_{pl} + s_{el}, \quad s_{el} = \beta \sum_i^n \frac{\sigma_{zp,i} \cdot h_i}{E_{el,i}},$$

$$s_{pl} = \beta \sum_i^n \frac{\sigma_{zp,i} \cdot h_i}{E_{pl,i}}, \quad C_z = \frac{p}{s}, \quad (1)$$

где  $\beta$  – безразмерный коэффициент, равный 0,8;  $\sigma_{zp,i}$  – среднее значение дополнительного вертикального нормального напряжения в  $i$ -м слое грунта по вертикали, проходящей через центр подошвы фундамента;  $h_i$  – толщина  $i$ -го слоя грунта;  $E_{el,i}$  – модуль упругих деформаций  $i$ -го слоя грунта;  $E_{pl,i}$  – модуль остаточных деформаций  $i$ -го слоя грунта;  $n$  – число слоев, на которое разбита сжимаемая толща основания;  $p$  – среднее давление по подошве штампа;  $C_z$  – коэффициент жесткости основания по рассматриваемой вертикали.

При определении углового перемещения от моментной нагрузки и горизонтального перемещения от касательной нагрузки применяется упруголинейная динамическая модель грунта, которая используется при решении задач о колебании жестких массивных фундаментов на сжимаемых основаниях, характеризующихся обобщенными коэффициентами [8]. В настоящей работе применяются коэффициенты упругого неравномерного сжатия  $C_\varphi$  и упругого неравномерного сдвига основания  $C_x$  [7, 8], которые могут быть найдены по следующим выражениям [8]:

$$C_\varphi = \frac{M}{I \cdot \varphi} = \frac{\chi_\varphi \cdot E}{\sqrt{A} \cdot (1 - \nu^2)},$$

$$C_x = \frac{Q}{A \cdot \Delta_x} = \frac{\chi_x \cdot E}{\sqrt{A} \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - \nu \cdot \chi_x)},$$
(2)

где  $N$ ,  $M$ ,  $Q$  – соответственно продольная сила, изгибающий момент и поперечная (горизонтальная) сила, действующие на жесткий штамп;  $A$ ,  $I$  – площадь и момент инерции площади подошвы штампа;  $s$ ,  $\varphi$ ,  $\Delta_x$  – соответственно осадка, угол поворота и горизонтальное перемещение жесткого штампа;  $\chi_\varphi$ ,  $\chi_x$  – коэффициенты формы подошвы жесткого штампа.

Нагрузку от железнодорожного крана и шпальных клетей на земляное полотно можно рассматривать как прямоугольную площадку поверхности основания, загруженной равномерно распределенной нормальной и горизонтальной нагрузками.

Задача определения напряженно-деформированного состояния (НДС) основания под действием равномерно распределенной нормальной нагрузки по площади прямоугольника была решена А. Лявом (рис. 2). Компоненты напряжений в точках, расположенных на линиях вдоль оси  $Z$  и вдоль прямой, параллельной оси  $Z$ , проходящей через угловую точку  $C$ , записываются следующим образом [8, 10]:

$$\sigma_{z_0} = \frac{2p}{\pi} \times \left[ \arctg \frac{a \cdot b}{z \sqrt{a^2 + b^2 + z^2}} + \frac{a \cdot b \cdot z (a^2 + b^2 + 2z^2)}{(a^2 + z^2)(b^2 + z^2) \sqrt{a^2 + b^2 + z^2}} \right],$$
(3)

$$\sigma_{z_C} = \frac{2p}{\pi} \times \left[ \arctg \frac{4a \cdot b}{z \sqrt{4a^2 + 4b^2 + z^2}} + \frac{4a \cdot b \cdot z (4a^2 + 4b^2 + 2z^2)}{(4a^2 + z^2)(4b^2 + z^2) \times \sqrt{4a^2 + 4b^2 + z^2}} \right],$$
(4)

$$\sigma_C = \frac{p}{\pi} (1 + \nu) \cdot \arctg \frac{4ab}{z \sqrt{4a^2 + 4b^2 + z^2}}.$$
(5)

Выражения для всех компонентов напряжений представлены в [10] (здесь они не приводятся вследствие большой громоздкости).

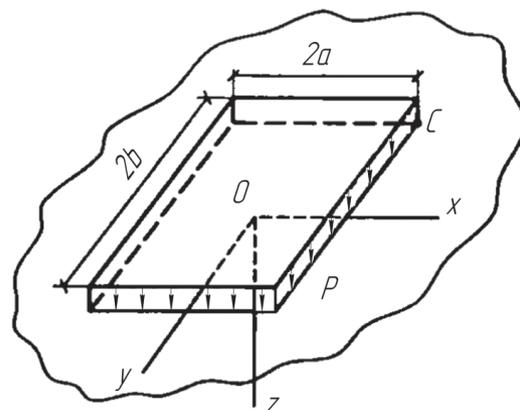


Рис. 2. Расчетная схема к задаче А. Лява

В рассматриваемом случае «фундаментом» являются шпальные выкладки, которые служат опорами железнодорожного грузоподъемного крана.

Разработанная реологическая схема грунта состоит из вертикально и наклонно расположенных моделей Кельвина–Фойгта, а также специальных моделей Кельвина–Фойгта, работающих только на сжатие. Горизонтальные составляющие наклонных моделей Кельвина–Фойгта моделируют сопротивление сдвиговым нагрузкам. Специальные модели Кельвина–Фойгта созданы с целью учета пластических свойств грунтового основания – в них не происходит восстановление деформаций после снятия нагрузки. Значения приведенных элементов настраиваются в соответствии с (1)–(5).

Единая схема взаимодействия каждого аутригера железнодорожного крана со шпальной клетью и шпальной клетки с грунтом опорной поверхности, состоящая из реологической модели грунта и модели шпальной выкладки, представлена на рис. 3.

Таким образом, предложенная реологическая модель с корректными параметрами составляющих элементов позволяет наиболее полно и точно отразить реальное поведение

грунтовых оснований при их нагружении и разгрузке в процессе работы грузоподъемного крана.

### Исследование вращения поворотной платформы

В функционале Motion программного комплекса SolidWorks осуществляется численный эксперимент по исследованию процесса вращения поворотной платформы железнодорожного крана с учетом податливости грунта и шпальных выкладок под выносными опорами (см. рис. 1, б).

Варьируя параметры составляющих элементов реологической модели грунта, можно получить как равномерную податливость грунта под каждой из опор, так и неравномерную податливость и/или внезапную просадку грунта под одной или несколькими опорами. В данной статье применяется равномерная податливость грунта основания.

В результате моделирования построены временные зависимости сил противодействия между выносными опорами и шпальными выкладками (рис. 4), величины осадки грунта под шпальными выкладками, угла наклона

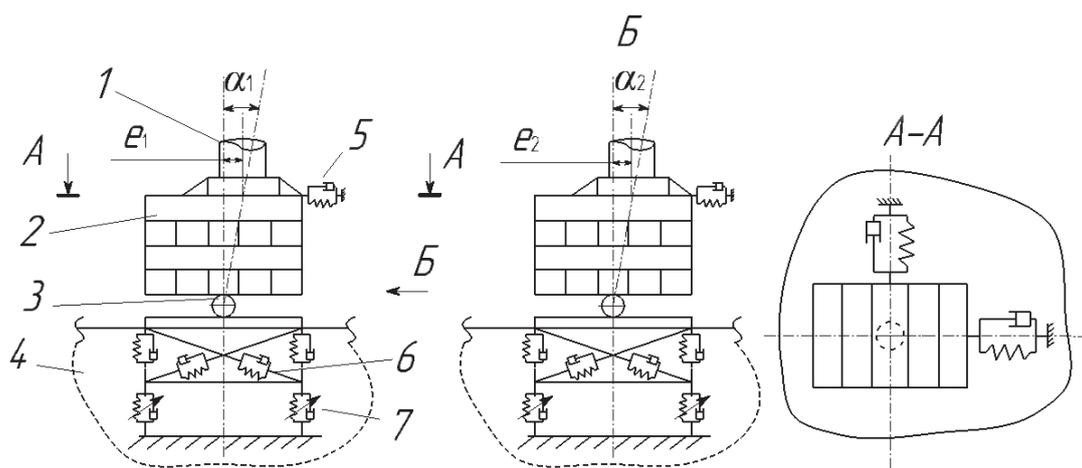


Рис. 3. Система «выносная опора–шпальная выкладка–грунт»:

1 – выносная опора; 2 – шпальная клеть; 3 – сферический шарнир; 4 – реологическая модель грунта; 5–7: модели Кельвина–Фойгта: 5 – вертикальные, 6 – наклонные, 7 – специальные;  $\alpha_1, \alpha_2$  – углы деформации шпальной выкладки;  $e_1, e_2$  – смещение опорной плиты аутригера

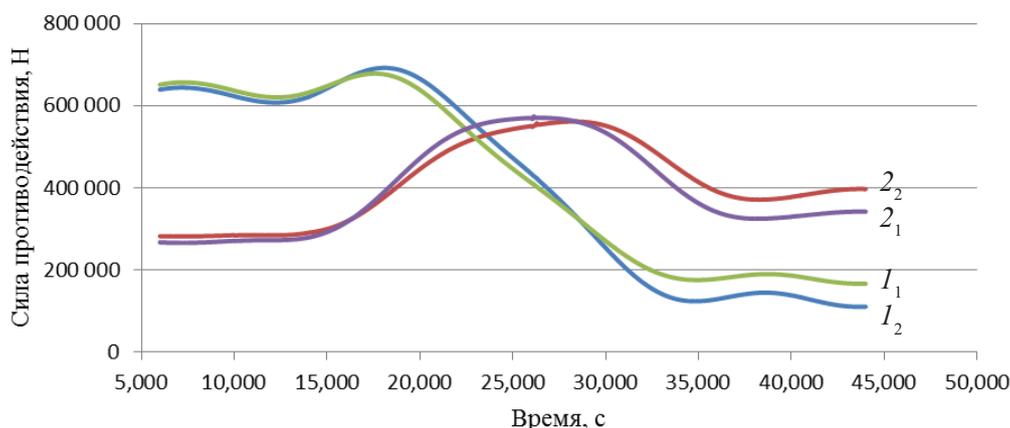


Рис. 4. Временная зависимость силы противодействия между выносными опорами  $I, 2$  и шпальной выкладкой при вращении:  
грунт:  $I_1, 2_1$  – абсолютно жесткий,  $I_2, 2_2$  – податливый под всеми опорами

платформы крановой установки, угла наклона шпальной выкладки и опорной плиты, горизонтальных составляющих сил противодействия между выносными опорами и шпальной выкладкой.

Таким образом, при нелинейно-деформируемой модели грунта [3] в процессе вращения происходит неравномерное, изменяющееся по времени, вдавливание шпальных выкладок в грунт, что приводит к изменению угла наклона платформы грузоподъемной машины и реакций выносных опор. При вращении поворотной платформы наблюдается циклический процесс трансформации ядра опирания, что вызывает соответственно циклическое нагружение грунта опорной площадки.

#### Определение напряженно-деформированного состояния земляного полотна

НДС массивов, сложенных из нелинейно деформируемых грунтов, получить в замкнутом виде аналитическими методами не удастся; для этого в настоящее время используют специальные численные методы конечных элементов (МКЭ), конечных разностей (МКР), граничных элементов (МГЭ) [8].

Динамическую модель воздействия от железнодорожного крана и шпальных выкладок

на земляное полотно можно упрощенно представить в виде прямоугольной площади поверхности, на которую влияет совокупность равномерных нормальных и касательных нагрузок, действующих определенный промежуток времени.

Для установления деформационных характеристик земляного полотна и балластной призмы под действием динамической нагрузки в условиях пространственной задачи применяется программный комплекс MIDAS GTS NX [11].

В расчетах в качестве модели грунтов используется упругопластическая модель Мора–Кулона, параметры которой определялись в соответствии со специализированной литературой [10, 12].

В программном комплексе MIDAS GTS проводится динамический расчет грунтового массива: значения реакций опор (разложенные по трем координатным осям), полученные в Motion SolidWorks, прикладываются к шпальным выкладкам в виде сил, представленных временными зависимостями (рис. 4). Также рассчитывалась устойчивость грунтового сооружения методом снижения прочности (SRM).

Одним из полученных результатов являются эпюра напряжений (рис. 5) и эпюра сдвиговых деформаций в момент начала движения крана (положение  $A$  на рис. 1, б).

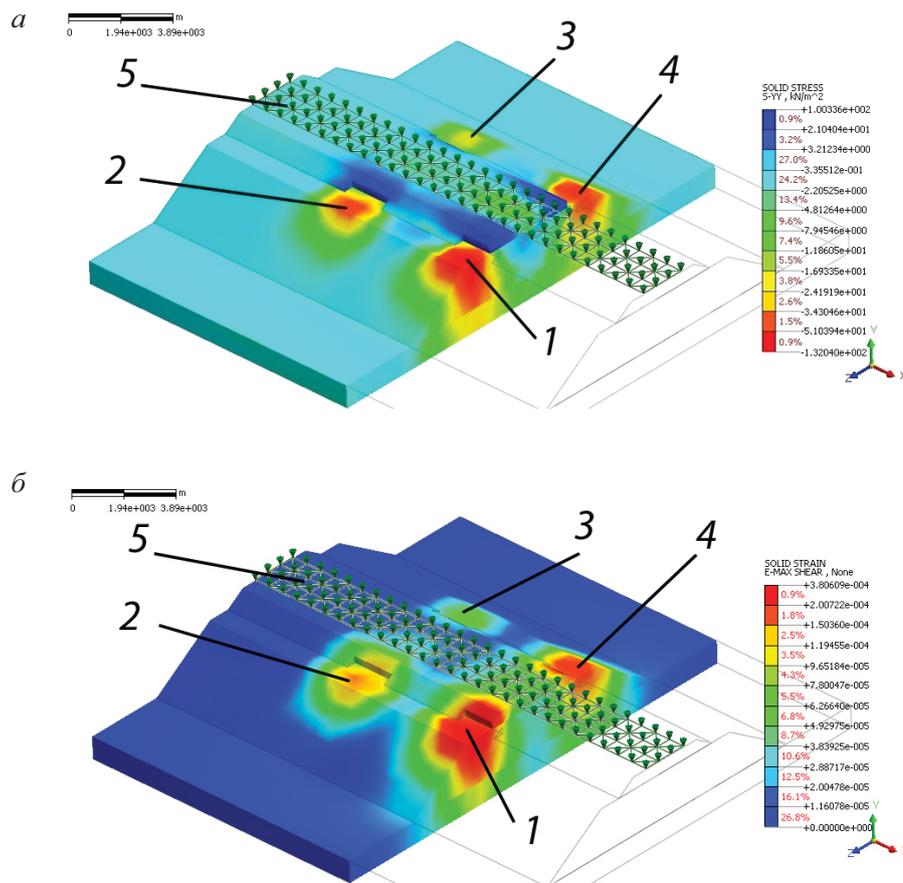


Рис. 5. НДС участка железнодорожного пути:  
эпюры: *а* – напряжений земляного полотна и балластной призмы, *б* – сдвиговых деформаций земляного полотна и балластной призмы; 1, 2, 3, 4 – опорные площадки соответствующих выносных опор; 5 – статическая нагрузка от рельсов и шпал

Представленная методика позволяет установить все компоненты НДС земляного полотна и балластной призмы для каждого момента времени динамического воздействия.

## Заключение

В результате проведенных исследований разработана пространственная расчетная динамическая модель, отражающая физическую картину деформирования системы «грузоподъемный кран–шпальная выкладка–грунт», учитывающая влияние шпальной выкладки и структуры грунта и действие инерционных нагрузок на опорный контур грузоподъемной машины. Это позволило определить:

- характер контакта аутригеров со шпальными клетями и шпальных клеток с грунтовой поверхностью в динамическом режиме нагружения;
- временные зависимости реакций выносных опор железнодорожной грузоподъемной машины в процессе вращения с учетом свойств грунта и влияния шпальной выкладки;
- пространственное динамическое НДС грунтового массива при работе грузоподъемного железнодорожного крана.

Данная динамическая модель также дает возможность изучить циклический процесс нагружения в связи с тем, что она принимает во внимание остаточную пластическую деформацию каждого предыдущего нагружения грунтового основания. Разработанная реологи-

ческая модель грунта при исключении из расчетной схемы элемента «шпальная выкладка» применима ко всем типам свободно стоящих грузоподъемных машин, расположенных на грунтовом основании. Это позволит получить аналогичные результаты и для других типов грузоподъемных машин.

### Библиографический список

1. Вайнсон А.А. Подъемно-транспортные машины : учебник для вузов по специальности Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование / А.А. Вайтсон. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1989. – 536 с.
2. Браунде В.И. Справочник по кранам : в 2 т. Т. 1 / В.И. Браунде, М.М. Гохберг, И.Е. Звянягин и др. ; под общ. ред. М.М. Гохберга. – Л. : Машиностроение, 1988. – 536 с.
3. Клепиков С.Н. Расчет сооружений на деформируемом основании / С.Н. Клепиков. – Киев : НИИСК, 1996. – 203 с.
4. Алямовский А.А. Инженерные расчеты и SolidWorks Simulation / А.А. Алямовский. – М. : ДМК Пресс, 2010. – 464 с. – (Сер. Проектирование)
5. Алямовский А.А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов : задачи, методы, рекомендации / А.А. Алямовский. – М. : ДМК Пресс, 2015. – 562 с.
6. Ватулин Я.С. Моделирование потери устойчивости свободно стоящих стреловых самоходных кранов / Я.С. Ватулин, Д.А. Потахов, Е.А. Потахов // Вестн. Ин-та проблем естественных монополий : Техника железных дорог. – 2016. – № 4 (36). – С. 60–66.
7. Цытович Н.А. Механика грунтов / Н.А. Цытович. – М. : Высшая школа, 1983. – 288 с.
8. Тер-Мартirosян З.Г. Механика грунтов : учеб. пособие / З.Г. Тер-Мартirosян. – М. : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2005. – 488 с.
9. Хархута Н.Я. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог / Н.Я. Хархута, Ю.М. Васильев. – М. : Транспорт, 1975. – 288 с.
10. Флорин В.А. Основы механики грунтов : в 2 т. / В.А. Флорин. – Л. : Стройиздат, 1959. – Т. 1. – 356 с. ; Т. 2. – 541 с.

11. MIDAS GTS NX. User's manual. Program Version : GTS NX 2014 v2.1, MIDAS Information Technology Co., Ltd., 2014.

12. Kenji Ishihara. Soil behaviour in earthquake geotechnics / Kenji Ishihara. – Oxford : Clarendon Press, 1996. – 350 p. – (Oxford Engineering Science Series)

### References

1. Vainson A.A. *Podyemno-trasportniye mashiny [Lifting-and-shifting machines weight-handling machines]*. College textbook for students specializing in “Lifting-and-shifting, building, road-building machines and equipment”. 4th ed., rev. and enlarged. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1989, 536 p. (In Russian)
2. Braunde V.I., Gohberg M.M., Zvyanyagin I.E. et al. *Spravochnik po kranam [Reference book on cranes]*. In 2 vol. Vol. 1. Under general editorship of M.M. Gohberg. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1988, 536 p. (In Russian)
3. Klepikov S.N. *Raschet sooruzheniy na deformiruyemom osnovanii [Calculation of structures on a deformable base]*. Kiev, Research Institute of Launch Complexes (NIISK) Publ., 1996, 203 p. (In Russian)
4. Alyamovskiy A.A. *Inzhenerniye raschety i SolidWorks Simulation [Engineering calculations and SolidWorks Simulation]*. Moscow, DMK Press, 2010, 464 p. (Series Designing) (In Russian)
5. Alyamovskiy A.A. *SolidWorks Simulation. Inzhenerniy analiz dlya professionalov: zadachy, metody, rekomendatsii [SolidWorks Simulation. Engineering analysis for professionals: tasks, methods, recommendations]*. Moscow, DMK Press, 2015, 562 p. (In Russian)
6. Vatulin Ya.S., Potakhov D.A. & Potakhov E.A. *Modelirovaniye potery ustoichivosty svobodno stoyashchykh strelovykh samokhodnykh kranov [Modeling the loss of stability of free-standing self-propelled gantry cranes]*. *Vestnik Instituta problem yestestvennykh monopoliy [Bulletin of the Institute of Natural Monopoly Problems: Railway Engineering]*, 2016, no. 4 (36), pp. 60–66. (In Russian)
7. Tsytovich N.A. *Mekhanika gruntov [Soil mechanics]*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1983, 288 p. (In Russian)

8. Ter-Martirosyan Z. G. *Mekhanika gruntov* [*Mechanics of soils*]. Ucheb. posobiye [Tutorial]. Moscow, Publ. House of the Association of Building Universities, 2005, 488 p. (In Russian)
9. Kharkhuta N. Ya. & Vasiliev Yu. M. *Prochnost, ustoichivost i uplotneniye gruntov zemlyanogo polotna avtomobilnykh dorog* [*Strength, stability and compaction of soil in the roadbed of motor roads*]. Moscow, Transport Publ., 1975, 288 p. (In Russian)
10. Florin V.A. *Osnovy mekhaniky gruntov. V 2 ch.* [*Fundamentals of soil mechanics. In 2 vol.*]. Leningrad, Strojizdat Publ., 1959, vol. 1, 356 p.; vol. 2, 541 p. (In Russian)
11. MIDAS GTS NX. User's manual. Program Version: GTS NX 2014 v2.1, MIDAS Information Technology Co., Ltd., 2014.
12. Kenji Ishihara. *Soil behaviour in earthquake geotechnics*. Oxford, Clarendon Press, 1996, 350 p. (Oxford Engineering Science Series)

ВАТУЛИН Ян Семенович – канд. техн. наук, доцент, yan-roos@yandex.ru; \*ПОТАХОВ Денис Александрович – аспирант, Schan-di@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 621.333

**И. П. Викулов, Т. М. Назирхонов****СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ЭЛЕКТРОВЗОВ СЕРИЙ «O’Z-ELR» И «O’ZBEKISTON»**

Дата поступления: 17.12.2018

Решение о публикации: 24.01.2019

**Аннотация**

**Цель:** Выбор оптимального варианта компоновки тягового привода электровозов переменного тока при организации электротягового движения в Республике Узбекистан; выполнение анализа параметров участка эксплуатации электровозов «Ангрен–Пап», сравнение технических характеристик электровозов серий «O’zbekiston» и «O’Z-ELR», дать рекомендации по выбору базовой компоновки тягового привода электровозов переменного тока для железных дорог Узбекистана.

**Методы:** Сравнительный анализ технических характеристик электровозов нового поколения производится на базе системного подхода. **Результаты:** Рассмотрены этапы развития тягового обеспечения на примере железнодорожной линии «Ангрен–Пап» Республики Узбекистан. Проведен сравнительный анализ тяговых и тормозных характеристик, силовых электрических схем, механической части, компоновки электрооборудования электровозов серий «O’zbekiston» и «O’Z-ELR». Установлены эксплуатационный и технико-экономический эффекты от использования электровозов на участках эксплуатации в Республике Узбекистан. Определены преимущества электровозов серии «O’Z-ELR» в части высокой надежности тягового привода и реализации большей силы тяги за счет поосного регулирования по сравнению с электровозами серии «O’zbekiston». **Практическая значимость:** Применение в эксплуатации электровозов серии «O’Z-ELR» на новых электрифицированных железнодорожных участках снижает затраты на техническое обслуживание и ремонт, а также позволяет увеличить средний вес поезда и грузооборот на участках эксплуатации с горным профилем.

**Ключевые слова:** Электровозы переменного тока, асинхронный тяговый привод, статический преобразователь, система управления.

**Ilia P. Vikulov**, Cand. Tech. Sci., associate professor, i\_vikulov@mail.ru; **\*Tologan M. ugli Nazirkhronov**, postgraduate student, talagan@mail.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF “O’Z-ELR” AND “O’ZBEKISTON” SERIES ELECTRIC LOCOMOTIVES: COMPARATIVE ANALYSIS. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-1-68-76

**Summary**

**Objective:** To select an optimum power actuator version for alternating current locomotives during the organization of service in the Republic of Uzbekistan. To conduct the parameter analysis of the running section for “Angren–Pap” electric locomotives, to compare performance characteristics of “O’zbekiston” and “O’Z-ELR” series electric locomotives, as well as to give recommendations on the selection of a power actuator basic version of alternating current locomotives for Uzbekistan railways.

**Methods:** Comparative analysis of the new generation electric locomotives performance characteristics is carried out on the basis of systems approach. **Results:** The development stages of traction power supply were considered by the example of the “Angren–Pap” railway line in the Republic of Uzbekistan. The comparative analysis of traction and braking performance, powered electric circuits, hardware, electric equipment layout of “O’zbekiston” and “O’Z-ELR” series electric locomotives was conducted. An operational and techno-economic effect from utilization of electric locomotives was established at the running section in the Republic of Uzbekistan. The advantages of “O’Z-ELR” series electric locomotives were determined; the former included the reliable power actuator and greater hauling power realization

by means of axle-by-axle regulation compared to “O’zbekiston” series electric locomotives. **Practical importance:** Running of “O’Z-ELR” series electric locomotives at the new electrified railway sections makes it possible to cut the expenses on technical maintenance and to increase the average trainload and freight turnover at running sections with rock profile.

**Keywords:** Alternating current locomotive, asynchronous power actuator, static converter, operating systems.

## Введение

К приоритетным задачам АО «Узбекистан темир йуллари» относится повышение скоростей движения пассажирских и грузовых поездов на железных дорогах Узбекистана для удовлетворения потребностей социально-экономического развития страны. С увеличением объемов перевозок и стоимости энергоресурсов, в том числе электроэнергии, возникает потребность в снижении затрат на тягу поездов. Возможности уменьшения затрат ищутся как на тяговом подвижном составе, так и в системе электроснабжения. К важным шагам в этом направлении относятся внедрение надежных и экономичных статических преобразователей в качестве тяговых на электровозах и электропоездах.

## Новая электрифицированная железнодорожная линия в Республике Узбекистан

Особое значение для развития железнодорожной сферы имеет новая электрифицированная железнодорожная линия «Ангрен–Пап», которая связывает центральную часть Узбекистана с областями Ферганской долины и служит важнейшим звеном транснационального транспортного коридора, соединяющего Европу с Азией. Это дорога, протяженностью 124,14 км, имеет 19-километровый железнодорожный тоннель через перевал Камчик, высота которого составляет свыше 2,2 тыс. м над уровнем моря. Она играет огромную стратегическую роль в перспективном развитии экономики Узбекистана. Ввод в эксплуатацию данного участка обеспечил завершение фор-

мирования единой по всей территории страны железнодорожной транспортной системы [1–3].

Железнодорожная линия «Ангрен–Пап» обслуживается локомотивным депо «Узбекистан». Эксплуатационный парк депо в основном составляют электровозы старого поколения серии ВЛ80 с и нового поколения серии «O’zbekiston». Партия односекционных электровозов с асинхронным тяговым приводом серии «O’zbekiston» в количестве 11 шт., произведенных на Чуджоуском электровозостроительном заводе в Китае, была закуплена в 2003 г. для замены электровозов ВЛ60 к и ВЛ80 с. Опыт эксплуатации электровозов «O’zbekiston» на горном участке «Ангрен–Пап» показал недостаточность тяговых и тормозных характеристик для вождения грузовых и пассажирских поездов требуемой массы. С целью повышения провозной способности участка «Ангрен–Пап» АО «Узбекистан темир йуллари» в 2015 г. закуплены электровозы повышенной мощности серии «O’Z-ELR» с асинхронным тяговым приводом.

Для обоснованного применения на железных дорогах Узбекистана современного тягового подвижного состава проведем сравнение технико-экономических показателей и конструктивных особенностей электровозов серий «O’Z-ELR» и «O’zbekiston».

## Основные характеристики электровозов серий «O’zbekiston» и «O’Z-ELR»

Шестиосный электровоз переменного тока серии «O’zbekiston» (рис. 1, а) оборудован асинхронным тяговым электроприводом,

а



б



Рис. 1. Электровозы серий «O'zbekiston» (а) и «O'Z-ELR» (б)

тяговыми преобразователями на базе ГТО-тиристоров, микропроцессорной системой управления, потележечным регулированием силы тяги и торможения [1, 2].

Шестиосные электровозы переменного тока серии «O'Z-ELR» (рис. 1, б) разработаны с учетом последних тенденций в области электровозостроения. Их характерной особенностью является применение тяговых преобразователей на базе IGBT-транзисторов для асинхронного тягового электропривода, микропроцессорной системы управления, поосного регулирования силы тяги и торможения, а также модульной компоновки электрооборудования. Основные технические характеристики электровозов показаны в таблице.

### Тяговая и тормозная характеристики электровозов

Пусковая тяговая сила электровоза серии «O'Z-ELR» составляет 490 кН, что на 9% больше, чем у серии «O'zbekiston». По тормозным характеристикам разница доходит до 18%, что можно увидеть на рис. 2, а, б. Повышение пусковой и тормозной характеристик электровоза достигается за счет применения новых ТЭД мощностью 1250 кВт и поосного регулирования [3, 4].

### Механическая часть электровозов

Проектирование и изготовление механической части электровоза серии «O'zbekiston» осуществлял Чуджоуский электровозостроительный завод. Основные особенности механической части состоят в том, что у электровоза имеются три двухосных тележки (рис. 3, а), которые соединены между собой тягами для улучшения входа и прохождения кривых. Преимущество двухосных тележек заключается в том, что они хорошо вписываются в кривые на больших скоростях. Кроме того, оси этих тележек могут быть ближе расположены к сцепным осям, что обеспечивает меньшее напряжение верхнего строения пути, и, наконец, они имеют лучшую способность самоустанавливаться (отсутствие косины) относительно рельсовых ниток [5].

Кузов и механическая часть электровоза серии «O'Z-ELR» спроектированы Даляньской локомотиво-вагоностроительной компанией ЛТД (КНР). Кузов грузового электровоза (см. рис. 1, б) изготовлен на основе кузова электровоза серии HXd3C (китайский шестиосный серийный электровоз переменного тока HXd3C, построенный в 2010 г. Даляньской локомотиво-вагоностроительной компанией ЛТД (КНР)) и во многом унифицирован с ним. Основные особенности механической части

## Сравнительная техническая характеристика электровозов серий «O'zbekiston» и «O'Z-ELR»

Параметры	«O'zbekiston»	«O'Z-ELR»
Завод-изготовитель	Чжучжоуская электровозостроительная компания CSR (КНР)	Даляньская локомотиво-вагоностроительная компания ЛТД CNR (КНР)
Тип электровоза	Грузо-пассажирский	Грузо-пассажирский
Вес, т	138 ± 2	138 ± 2
Длина кузова, мм	21 980	21 170
Мощность, кВт	6000	7200
Эксплуатационная скорость, км/ч	120	120
Максимальная конструкционная скорость, км/ч	130	134
Рабочее напряжение, В	25 000	25 000
Частота тока, Гц	50	50
Осевая нагрузка, т	23	23
Осевая формула	$B_o-B_o-B_o$	$C_o-C_o$
Диаметр колесной пары, мм	1250	1250
Начальная сила тяги, кН	450	490
Электрическая сила торможения, кН	285	336
Тип и мощность тягового электродвигателя, кВт	Асинхронный, 1024 (Siemens)	Асинхронный, 1250 (Toshiba)
Передаточное отношение тяги	4,7 (103/23)	4,81 (101/21)
Работоспособность при температуре окружающей среды, °С	-30...+50	-50... +50
Система торможения	Пневматическая и электрическая рекуперативная	Пневматическая и электрическая рекуперативная
Тип управления торможением	Механический кран	Микропроцессорный кран (MTZ)
Количество мотор-вентиляторов охлаждения ТЭД	6	2
Тяговый преобразователь	GTO (Siemens)	IGBT (Toshiba)
Тип установленных тормозных колодок	Чугунные	Композиционные
Датчики контроля нагрева букс	Отсутствуют	Установлены
Цепи питания ТЭД	Комбинированные (один инвертор для 2 ТЭД)	Индивидуальный (инвертор и выпрямитель для каждого ТЭД свой)
Компрессор малогабаритный	Масляный	Поршневой (безмасляный)

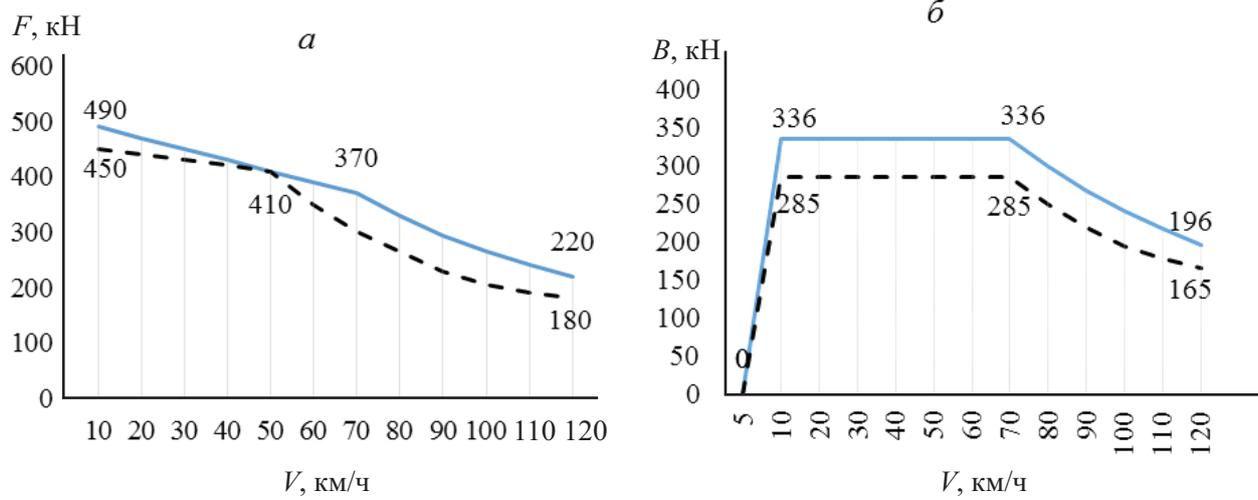


Рис. 2. Тяговые (а) и тормозные (б) характеристики ЭПС:  
серия электровоза: пунктирная линия – «O'Z-ELR», сплошная – «O'zbekiston»

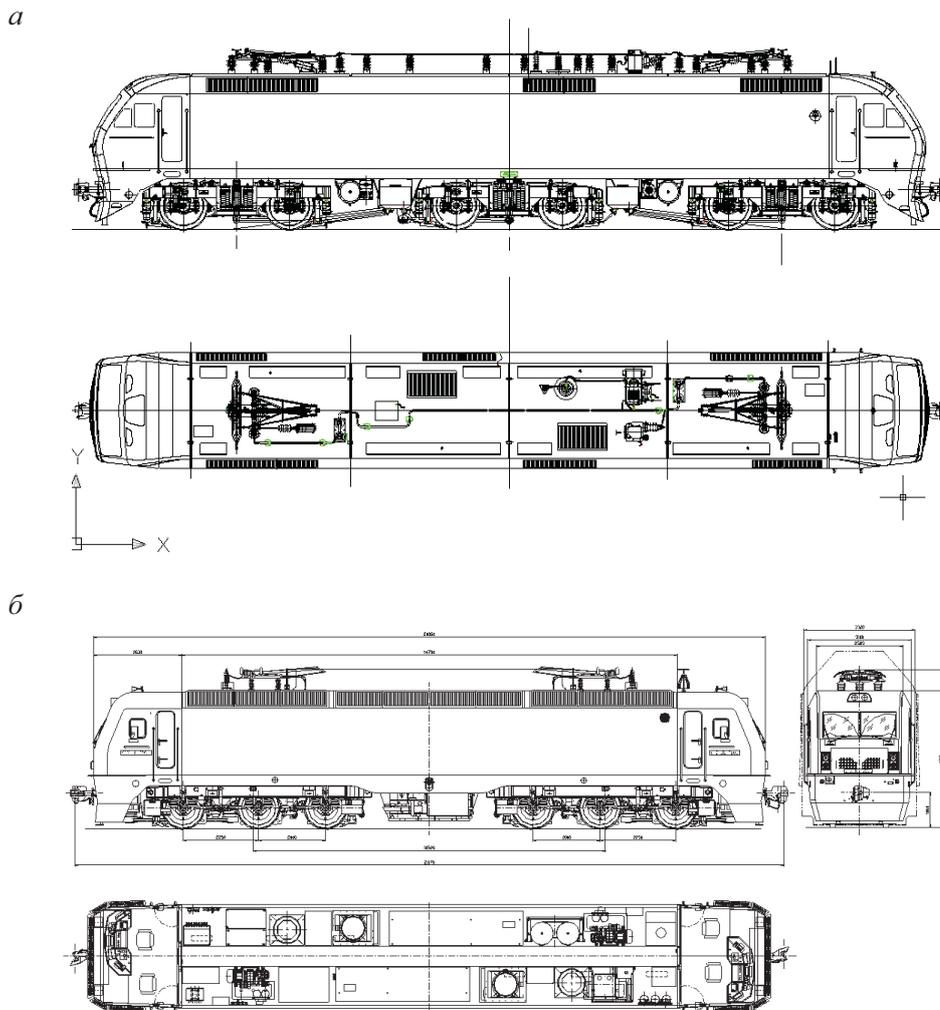


Рис. 3. Внешний вид электровозов серий «O'zbekiston» (а) и «O'Z-ELR» (б)

состоят в том, что у электровоза имеются две трехосных тележки (рис. 3, б), отличающиеся тем, что они легче преодолевают неровности пола [6].

### Особенности электрической схемы

К особенностям электрических схем электровозов относится тип тягового преобразова-

теля – переменного-постоянно-переменный. Электрическая часть электровозов серии «O'zbekiston» (рис. 4, а) изготовлена по патенту компании Siemens AG. В разработке электрической части электровозов серии «O'Z-ELR» (рис. 4, б) приняла участие компания Toshiba [7, 8].

В отличие от электровозов серии «O'zbekiston» тяговые преобразователи электровозов серии «O'Z-ELR» оснащены IGBT-тран-

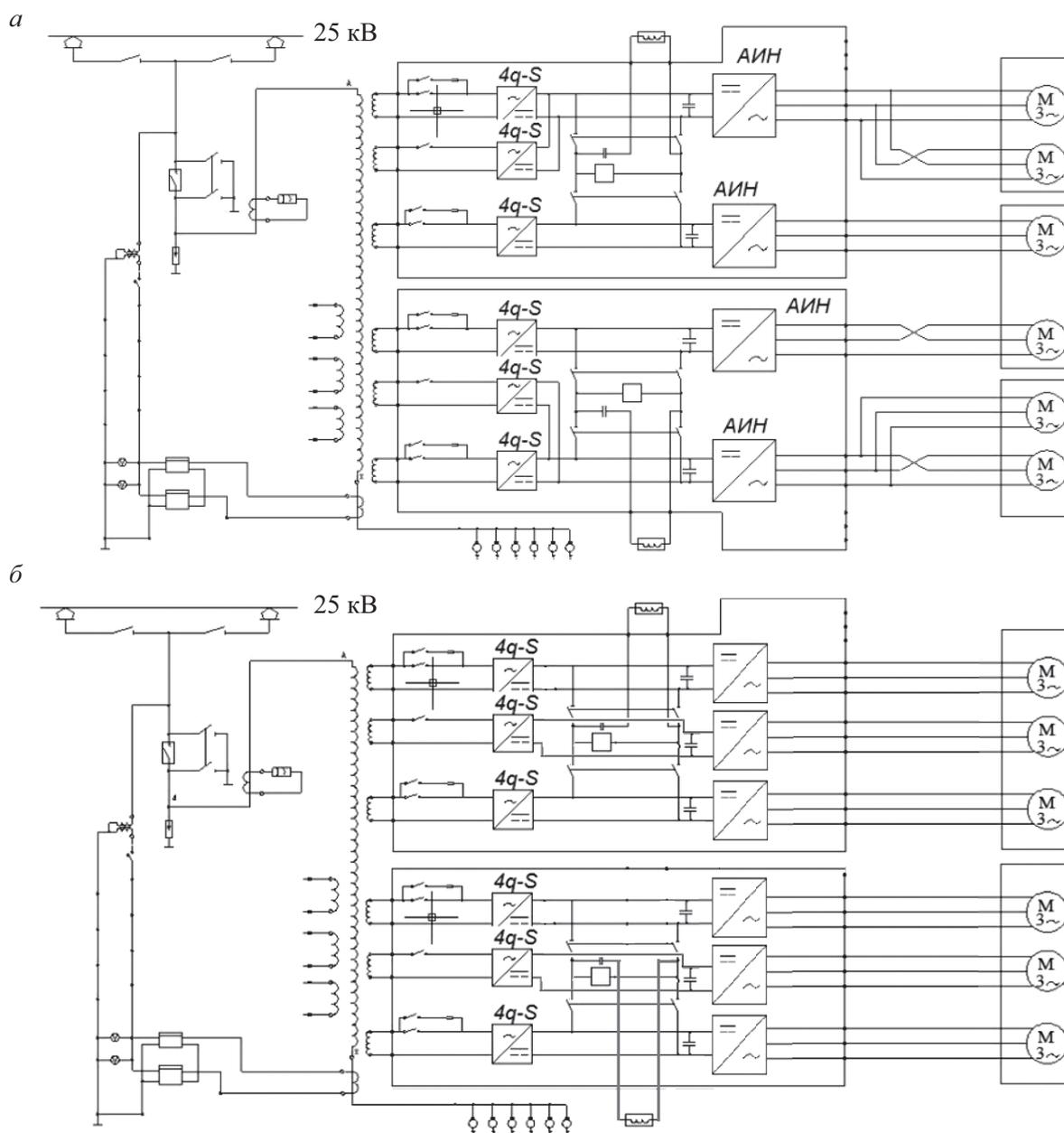


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема электровоза серии «O'zbekiston» (а) и «O'Z-ELR» (б)

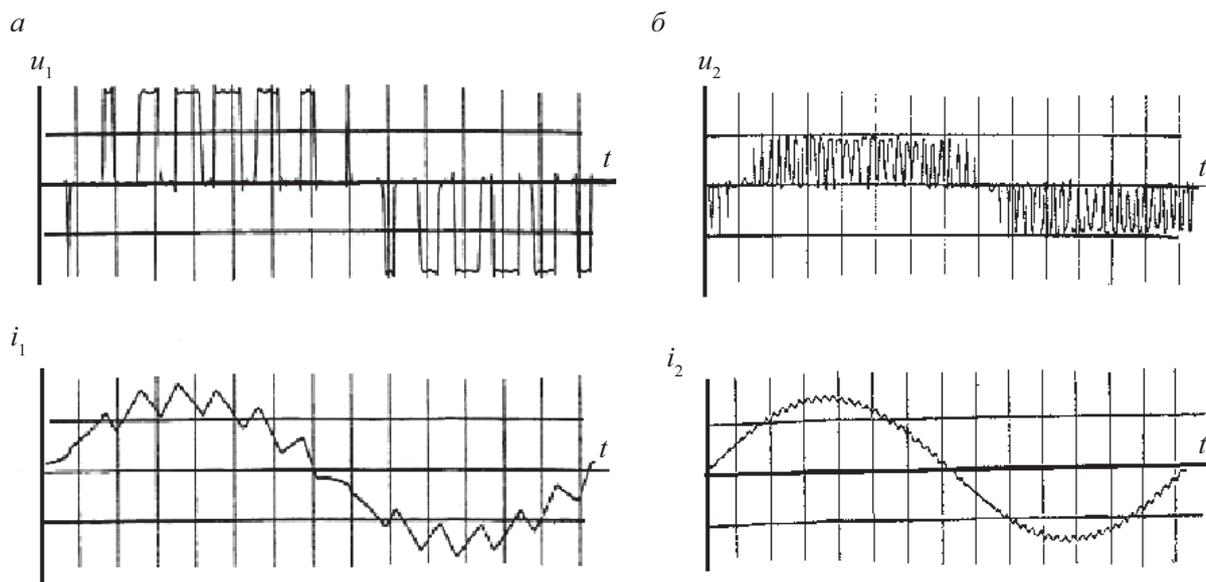


Рис. 5. Осциллограммы выходного напряжения и тока преобразователей:  
а – на GTO-тиристорах; б – на IGBT-транзисторах

зисторами, что повышает качество управления тяговым приводом за счет более высоких частотных характеристик транзисторных модулей. Диаграмма напряжений и токов фазы автономного инвертора напряжения (АИН) показана на рис. 5 [8–13].

### Эксплуатация и технико-экономический эффект электровозов

Новые электровозы серии «O'Z-ELR» предназначены для эксплуатации в сложных горных условиях и имеют ряд преимуществ по сравнению с электровозами других производителей. В частности, расход электроэнергии на тягу поездов здесь ниже на 5–8% за счет применения рекуперативного торможения, а повышенная мощность позволяет в горных условиях осуществлять вождение грузовых поездов массой 4500–4700 т [14, 15].

Введение электровоза серии «O'Z-ELR» в эксплуатацию позволило увеличить средний вес поезда и грузооборот на участке «Ангрен–Пап». Это дало ощутимый технико-экономический эффект. По данным компании АО «Узбекистон темир йуллари» применение электровозов на участке «Ангрен–Пап»

привело к сокращению на 25% трудоемкости технического ремонта, на 40% затрат на материально-техническое обеспечение технических обслуживаний и ремонтов, а также к уменьшению на 10% расхода потребляемой электроэнергии за счет использования рекуперативного торможения и увеличения на 12% среднего веса перевозимых поездов [15].

### Заключение

Опыт обслуживания электровозов серии «O'Z-ELR» показал снижение затрат по сравнению с серией «O'zbekiston» на техническое обслуживание и ремонт электровозов благодаря понижению трудоемкости ремонта, стоимости запасных частей и времени простоя в ремонтах.

За все время эксплуатации электровозов серьезных поломок практически не случалось. Замена подлежали лишь быстро изнашиваемые элементы. Неполадки наблюдались в основном в начальный период эксплуатации, которые быстро устранялись представителями завода и компании Toshiba [7].

Результаты, полученные в ходе опытной эксплуатации, позволяют обоснованно ре-

комендовать к применению на новых электрифицированных участках железных дорог Узбекистана электровазы серии «O'Z-ELR» как более надежные и экономически эффективные по сравнению с электровазами серии «O'zbekiston».

### Библиографический список

1. Абдуллаев А. А. Достижения ГАЗК «Узбекистан темир йуллари» / А. А. Абдуллаев // ГАЗК Узбекистон темир йуллари : презентация. – Ташкент : ГАЗК, 2009. – С. 32–35.

2. Плакс А. В. Электроваз «Узбекистон» / А. В. Плакс, Д. О. Раджибаев // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2009. – № 3. – С. 47–56.

3. Овчинников А. Н. Скоростное и высокоскоростное движение на железных дорогах Узбекистана / А. Н. Овчинников, А. Ф. Расулов, З. Т. Фозилов // Путь. – 2012. – № 5. – С. 65–67.

4. Плакс А. В. Электроваз серии «O'zbekiston» / А. В. Плакс, Д. О. Раджибаев, Х. М. Турсунов // Вестн. ВЭЛНИИ. – Новочеркасск : ВЭЛНИИ, 2011. – № 1. – С. 114–127.

5. Назирхонов Т. М. Обслуживание тяговых преобразователей на электрическом транспорте Узбекистана / Т. М. Назирхонов // X Междунар. науч.-практич. конференция «TRANS-MECH-ART-СHEM». – М. : МИИТ, 2014. – С. 80–81.

6. Плакс А. В. Новый пассажирский электроваз серии «O'Z-Y» / А. В. Плакс, Д. О. Раджибаев, Х. М. Турсунов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2011. – № 1. – С. 237–240.

7. Мощный электрический локомотив с приводом переменного тока типа СKE2. Руководство машиниста по эксплуатации. – Ташкент, 2014. – 120 с.

8. Литовченко В. В. 4q-S четырехквadrантный преобразователь электровазов переменного тока / В. В. Литовченко // Изв. вузов. Электромеханика. – 2000. – № 3. – С. 64–73.

9. Плакс А. В. Системы управления электрическим подвижным составом : учебник для вузов ж.-д. транспорта / А. В. Плакс. – М. : Маршрут, 2005. – 357 с.

10. Турсунов Х. М. Современные электровазы для железной дороги Республики Узбекистан / Х. М. Турсунов // Технические науки – от теории к практике : сб. статей по материалам VI Междунар. науч.-практич. конференции. – Новосибирск : СибАК, 2012. – С. 75–78.

11. Kehrman H. Vierquadrantsteller – eine netzfreundliche Einspeisung für Triebfahrzeuge mit Drehstromantrieb / H. Kehrman, W. Lienau, R. Nill // Elektrische Bahnen. – 1974. – Т. 45, Н. 6. – S. 135–142.

12. Вольвич А. Г. Системы управления электроподвижным составом на современной элементной базе / А. Г. Вольвич, В. Н. Плис, Б. И. Хоменко // Сб. науч. трудов Всерос. науч.-исслед. и проект. конструктор. ин-та электровазостроения. – Новочеркасск, 1999. – № 41. – С. 27–32.

13. Милешин В. Применение микропроцессоров в системах управления транзисторных выпрямителей / В. Милешин, Д. Овчинников // Силовая электроника. – 2005. – № 4. – С. 50–53.

14. Бахвалов Ю. А. Динамические процессы в асинхронном тяговом приводе магистральных электровазов / Ю. А. Бахвалов, Г. А. Бузало, А. А. Зарифьян и др. – М. : Маршрут, 2006. – 374 с.

15. Статистическая информация по итогам работы АО «Узбекистон темир йуллари» за I полугодие 2018 года. – URL : <http://railway.uz/ru/gazhk/statisticheskie-dannye> (дата обращения : 23.11.2018).

### References

1. Abdullayev A. A. *Dostizheniya GAZhK “Uzbekistan temir yullary”* [Achievements of GAZhK “O'zbekiston temir yo'llari”]. Tashkent, GAZhK Publ., 2009, pp. 32–35.

2. Plaks A. V. & Radzhibayev D. O. Elektrovoz “Uzbekiston” [“Uzbekiston” electric locomotive]. *Izvestiya Peterburgskogo Universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. Saint Petersburg, Petersburg Transport University Publ., 2009, no. 3, pp. 47–56. (In Russian)

3. Ovchinnikov A. N., Rasulov A. F. & Fozilov Z. T. *Skorostnoye i vysokoskorostnoye dvizheniye na zheleznykh dorogakh Uzbekistana* [Rapid and high-

- speed running on the Railways of Uzbekistan]. *Put [The Path]*, 2012, no. 5, pp. 65–67. (In Russian)
4. Plaks A. V., Radzhibaev D. O. & Tursunov Kh. M. Elektrovoz serii «O'zbekiston» [The electric locomotive of «O'zbekiston» series]. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo i proektno-konstruktor'skogo instituta elektrovozostroyeniya [Bulletin of All-Russian Scientific-Research Design and Construction Institute of Electric Locomotive Building]*. Novocherkassk, All-Russian Scientific-Research Design and Construction Institute of Electric Locomotive Building Publ., 2011, no. 1, pp. 114–127. (In Russian)
5. Nazikhonov T. M. Obsluzhivaniye tyagovykh preobrazovateley na elektricheskoy transporte Uzbekistana [Maintenance of traction converters on Uzbekistan electric transport]. *Sbornik X Mezhdunar. nauch.-praktich. konferentsii "TRANS-MECH-ART-CHEM" [Coll. papers of the 10<sup>th</sup> International research and training conference "TRANS-MECH-ART-CHEM"]*. Moscow, Russian University of Transport (MIIT) Publ., 2014, pp. 80–81. (In Russian)
6. Plaks A. V., Radzhibaev D. O. & Tursunov Kh. M. Noviy passazhirskiy elektrovoz serii "O'Z-Y" [The new «O'Z-Y» series passenger electric locomotive]. *Nauchnye problemy transporta Sibiry [Scientific transport issues of Siberia and the Far East]*, 2011, no. 1, pp. 237–240. (In Russian)
7. Moshchniy elektricheskii lokomotiv s privodom peremennogo toka tipom CKE2 [High-powered electric locomotive with CKE2 type alternating-current drive]. *Rukovodstvo mashinista po ekspluatatsii [Service instruction]*. Tashkent, 2014, 120 p. (In Russian)
8. Litovchenko V. V. 4q-S chetyrekhkvadratniy preobrazovatel elektrovozov peremennogo toka [A 4q-S four-quadrant converter of alternating current locomotives]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika [Proceedings of Higher Educational Institutions. Electromechanics]*, 2000, no. 3, pp. 64–73. (In Russian)
9. Plaks A. V. *Sistemy upravleniya elektricheskym podvizhnym sostavom [Operating systems of electric vehicles]*. College textbook for transport universi-
- ties. Moscow, Marshrut Publ., 2005, 357 p. (In Russian)
10. Tursunov Kh. M. Sovremenniye elektrovozy dlya zheleznoy dorogi Respubliki Uzbekistan [Modern electric locomotives for railways of the Republic of Uzbekistan]. *Tekhnicheskiye nauki – ot teorii k praktike [Engineering sciences – from theory to practice]*. Sbornik statey po materialam VI Mezhdunar. nauch.-praktich. konferentsii (Coll. papers of the 6<sup>th</sup> International research and training conference). Novosibirsk, SibAC Publ., 2012, pp. 75–78. (In Russian)
11. Kehrmann H., Lienau W. & Nill R. Vierquadrantsteller – eine netzfreundliche Einspeisung für Triebfahrzeuge mit Drehstromantriebe. *Elektrische Bahnen*, 1974, T. 45, H. 6, S. 135–142.
12. Volvich A. G., Plis V. N. & Khomenko B. I. Sistemy upravleniya elektropodvizhnym sostavom na sovremennoy elementnoy baze [The electric stock operating systems on modern element base]. *Sbornik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo i proektno-konstruktor'skogo instituta elektrovozostroyeniya [Coll. papers of All-Russian Scientific-Research Design and Construction Institute of Electric Locomotive Building]*. Novocherkassk, 1999, no. 41, pp. 27–32. (In Russian)
13. Mileshin V. & Ovchinnikov D. Primeneniye mikroprotssessorov v sistemakh upravleniya tranzistornykh vypryamiteley [Application of microprocessor units in operating systems of solid-state rectifiers]. *Silovaya elektronika [Power electronics]*, 2005, no. 4, pp. 50–53. (In Russian)
14. Bakhvalov Yu. A., Buzalo G. A., Zarifjan A. A. et al. *Dinamicheskiye protsessy v asinkhronnom tyagovom privode magistralnykh elektrovozov [Dynamic processes in asynchronous power actuator of mainline electric locomotives]*. Moscow, Marshrut Publ., 2006, 374 p. (In Russian)
15. *Statisticheskaya informatsiya po itogam raboty AO "O'zbekiston temir yo'llari" za 1 polugodiye 2018 goda [Half-yearly statistics data on the basis of AO "O'zbekiston temir yo'llari" performance in 2018]*. URL: <http://railway.uz/ru/gazhk/statisticheskije-dannye/> (accessed: 23.11.2018). (In Russian)

ВИКУЛОВ Илья Павлович – канд. техн. наук, доцент, i\_vikulov@mail.ru; \*НАЗИРХОНОВ Тулаган Мансурхон угли – аспирант, tolagan@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 621.891:536.12

**А. А. Воробьев, Т. Г. Бунькова, А. А. Соболев**  
**К ВОПРОСУ ОБ ОПТИМАЛЬНОМ СООТНОШЕНИИ**  
**ТВЕРДОСТИ ПАРЫ «КОЛЕСО–РЕЛЬС»**

Дата поступления: 26.01.2019

Решение о публикации: 29.01.2019

**Аннотация**

**Цель:** Опытное выявление оптимального соотношения твердости пары трения «колесо–рельс». **Методы:** Для определения процесса взаимодействия колеса и рельса, а также для построения модели силового взаимовлияния пары «колесо–рельс» была разработана оригинальная испытательная установка посредством глубокой модернизации поперечно-строгального станка модели 735. На испытательной установке использовались образцы в форме роликов из колесной стали, закрепленные на ее подвижной части, и рельс марки Р65, закрепленный неподвижно. **Результаты:** Создана математическая модель, позволяющая прогнозировать износ в системе «колесо–рельс», а также определены оптимальные соотношения твердости пары «колесо–рельс» при различных условиях эксплуатации. Рекомендуемые значения твердости рельса соответствуют 362–401 НВ, а колеса – 361–388 НВ. **Практическая значимость:** Полученные рекомендации по выбору оптимального соотношения твердости колеса и рельса можно учитывать при проектировании нового подвижного состава и укладке железнодорожного полотна. Выведенные в работе соотношения твердости позволяют увеличить ресурс в системе «колесо–рельс» до 2 раз по сравнению с используемым на железных дорогах.

**Ключевые слова:** Система «колесо–рельс», ресурс колеса и рельса, твердость, колесная и рельсовая стали, изнашивание, износостойкость.

\***Aleksandr A. Vorobyev**, Cand. Eng. Sci., associate professor, 89219751198@yandex.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University); **Tamara G. Bunkova**, teacher, bunkovatg@mail.ru (Omsk State Transport University); **Alexander A. Sobolev**, Cand. Eng. Sci., associate professor, a89213194387@yandex.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) ON THE PROBLEM OF BEST HARDNESS RATIO IN WHEEL-RAIL PAIR. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-1-77-86

**Summary**

**Objective:** Experimental identification of best hardness ratio for “wheel–rail” friction pair. **Methods:** An original test installation was developed to determine the process of wheel and rail interaction process and to build a model for power inter-influence in “wheel–rail” pair by deep modernization of model 735 horizontal shaping machine. Specimen in the form of rolling elements made of wheel steel, attached to its moving part, and a fixed mark R65 rail were used in the test installation. **Results:** A mathematical model was created, allowing predictions of wear in the “wheel–rail” system. Best hardness ratios in the “wheel–rail” pair were determined for various operation conditions. Recommended rail hardness values are between 362 and 401 HB, wheel hardness values – between 361 and 388 HB. **Practical importance:** The obtained recommendations on selection of best wheel and rail hardness may be taken into account in designing new rolling stock and laying railway tracks. Hardness inter-influences identified in the process of study permit to increase the life cycle in the “wheel–rail” system by up to 100 percent compared to those currently used on the railways.

**Keywords:** “Wheel–rail” system, wheel and rail life cycle, hardness, wheel and rail steel, wear and tear, wear-resistance.

Одной из основных характеристик, определяющих срок службы колес и рельсов, является твердость. До недавнего времени исследования взаимосвязи между износостойкостью и твердостью проводились без учета степени взаимного воздействия твердости одного элемента на износостойкость другого в системе «колесо–рельс».

Для повышения износостойкости и снижения интенсивности изнашивания цельнокатаных колес грузовых вагонов и железнодорожных рельсов необходимо установить оптимальное соотношение твердости пары «колесо–рельс» [1].

В результате эксплуатации на сети дорог ОАО «РЖД» колес марки «Т» (повышенной твердости) выявлены их преимущества перед серийными колесами: обеспечение большей нагрузки на ось, повышенные ресурсно-эксплуатационные характеристики и др. Из недостатков следует отметить увеличение дефектов термомеханического происхождения, таких как ползуны и выщербины.

В процессе исследований, проведенных ВНИИЖТом в 1960–1980-х годах [2], было най-

дено, что для равной износостойкости соотношение твердостей колеса и рельса должно быть не менее 1,2 при проскальзывании не более 1% (рис. 1, [3–5]), в то время как в США отношение твердости колес грузовых вагонов  $HВ_k$  варьируется от 325 до 365, а основного типа рельсов ( $HВ_p$ ) – от 300 до 330 соответственно (см. рис. 2, [4, 5]). Таким образом, отношение твердости колеса к твердости рельса для США составляет 1,1, а для стран Европы – 1,15.

Для определения оптимального соотношения между твердостями колеса и рельса были проведены эксперименты с использованием установки, созданной на базе станка модели 1 К62 [6]. Образцами колеса служили ролики из колесной стали, а рельса – диск, изготовленный из рельса марки Р65. Твердость диска оставалась неизменной и равной 401, что соответствует верхнему значению твердости рельса по ГОСТ Р51685–2000 [7], а твердость колесного ролика варьировалась от 293 до 363, что соответствует твердости колесной стали по ГОСТ 10791–2011 [8]. В результате экспериментов были выявлены величины твердости  $HВ_k$  и нагрузок  $P_1$  и  $P_2$ , при кото-

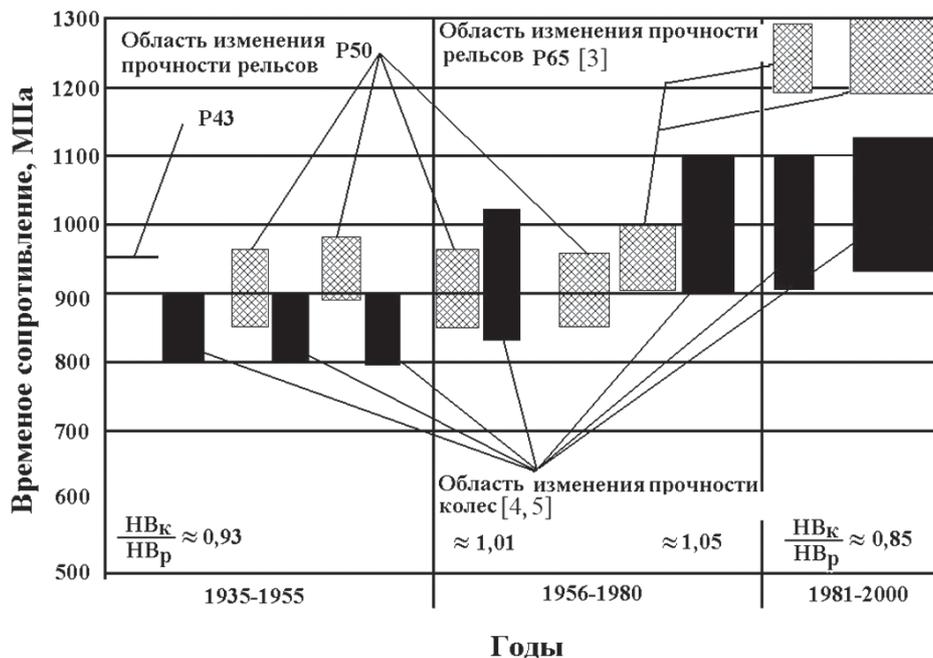


Рис. 1. Изменение физико-механических характеристик колеса и рельса на сети железных дорог Российской Федерации

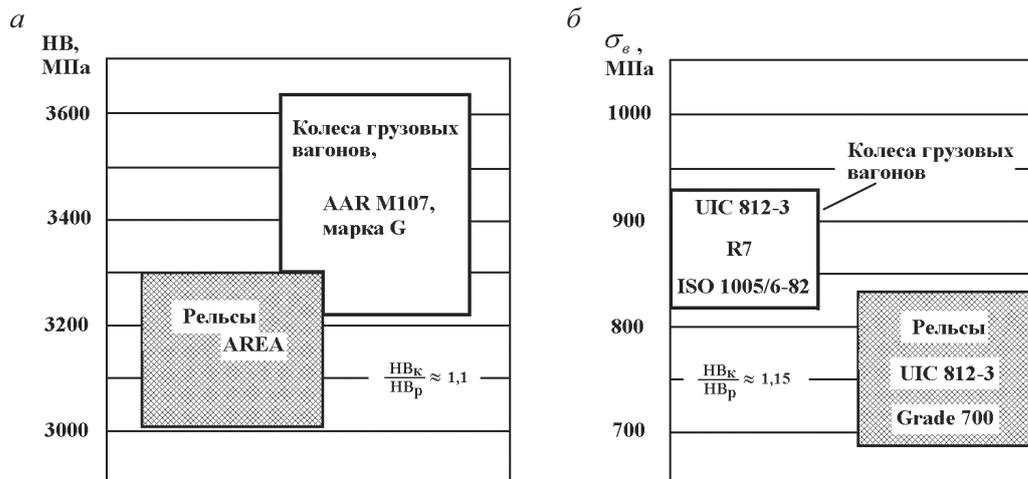


Рис. 2. Физико-механические характеристики колеса и рельса в США (а) и странах Европы (б)

рых износ колеса и рельса был минимальным. Тем же способом было определено оптимальное соотношение твердости колеса и рельса

$$\frac{HB_k}{HB_p} = \frac{363}{401} = 0,91 - \frac{HB_k}{HB_p} = \frac{388}{401} = 0,97 \text{ или}$$

$$\frac{HB_k}{HB_p} = \frac{363}{363} = 1,00. \text{ С целью достижения боль-}$$

шей точности возникла необходимость в проведении дополнительной серии экспериментов [9].

Для моделирования нагружения колеса на рельс и взаимодействия в процессе перемещения колеса по рельсу была разработана новая испытательная установка [10]. За ее основу был взят поперечно-строгальный станок модели 735 (рис. 3). Эта установка состояла из модели колеса 1, установленной в центрах вилки 2, закрепленной в нагрузочном устройстве 5 на суппорте поперечно-строгального станка, и модели рельса 3. Модели колеса и рельса изготовлены соответственно из колесной и рельсовой сталей. Их профили также соответствуют профилям колеса и рельса. Для создания условий, идентичных циклическому взаимодействию колеса со стыковым соединением звеньев рельсовой нити, на модели рельса в средней части изготовлен пропил, параллельный оси вращения модели колеса. Модель колеса имеет возможность перемещения тарированной пружиной нагружения

в вертикальном направлении и вдоль модели рельса. Формы профилей рабочих поверхностей колеса и рельса на моделях уменьшены в 3 раза.

Для выявления оптимального соотношения твердостей колеса и рельса был проведен эксперимент с использованием некопозиционного ротатбельного плана второго порядка,

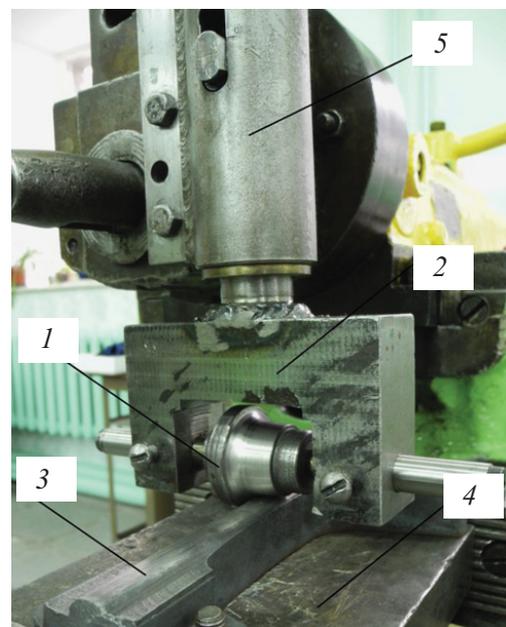


Рис. 3. Установка на базе поперечно-строгального станка модели 735 износостойкости колеса и рельса: 1 – модель колеса; 2 – вилка; 3 – модель рельса; 4 – плита; 5 – нагрузочное устройство

причем  $\frac{НВ_k}{НВ_p} = 1,00$ . Именно такое соотношение применялось, потому что чем больше элементы отличаются по твердости, тем сложнее происходит притирка твердого элемента и тем быстрее изнашивается более мягкий элемент, который в конечном итоге выходит из строя. Поэтому элементы должны иметь приблизительно одинаковую твердость.

Так как в процессе эксплуатации поверхностный слой металла колеса и рельса упрочняется и соотношение твердостей должно быть приближено к единице, твердость образцов колеса и рельса принималась равной 440, 400, 360 и 320 НВ – для первой, второй, третьей и четвертой серий опытов соответственно. Значения скоростей и нагрузок отбирались в соответствии с линейной скоростью вращения колесной пары и нагрузкой на ось, действующей в эксплуатации, с учетом поправочных коэффициентов согласно  $\pi$ -теореме. С учетом технических возможностей экспериментальной установки максимальная нагрузка на ось  $P_{\max} = 23$  кН, а скорость  $V_{\max} = 70$  км/ч. Поправочный коэффициент для вертикальной нагрузки, действующей на прямых участках пути,  $k_{\text{попр}} = 54,7$ . Поправочный коэффициент для скорости движения колеса  $k_{\text{попр}} = 0,4$ . Рассматривая взаимодействие в системе колеса и рельса были выделены два независимых входных фактора:  $x_1$  – вертикальная сила  $P$ ,

действующая на колесо;  $x_2$  – скорость движения поезда.

В качестве характеристики интенсивности изнашивания для рельса принималась  $y_b$  – относительное изменение линейного размера, а для колеса  $y_a$  – относительная потеря массы образца.

Уравнения регрессии, описывающие влияние нагрузки и скорости движения вагона на износостойкость колеса  $y_a$ , рельса  $y_b$ , имеют вид

$$y_a = 0,0175 + 0,0133x_1 + 0,0115x_2 + 0,0125x_1^2 - 0,0008x_2^2, \quad (1)$$

$$y_b = 0,015 + 0,01x_1 + 0,0058x_2 + 0,01x_1^2 - 0,0033x_2^2. \quad (2)$$

По критерию Стьюдента и  $F$ -критерию Фишера [11] была выполнена проверка коэффициентов регрессии на статистическую значимость. Так как гипотеза об адекватности не отвергается (выполняется условие  $F_p < F_{\text{табл}}$ ), уравнения регрессии могут быть применены как математическая модель для определения износостойкости пары «колесо–рельс».

С помощью программного комплекса STATISTICA для иллюстрации эффективности работы созданной модели изображены линии равного отклика (рис. 4, 5). По этим линиям можно перейти от кодированных значений  $x_1$ ,

ТАБЛИЦА 1. Соотношение линейной скорости образца и вагона

$V_{\text{обр}}$ , м/мин	$k_{\text{попр}}$	$V_{\text{п}}$ , км/ч
7,6	0,4	20
18		45
28,4		70

ТАБЛИЦА 2. Интервалы и уровни варьирования факторов

Факторы	Обозначение факторов	Интервал варьирования	Уровни факторов						
			-1	-0,866	-0,5	0	+0,5	+0,866	+1
$P$ , Н	$x_1$	780	420	–	810	1200	1590	–	1980
$V$ , м/мин	$x_2$	30	6	7,6	–	18	–	28,4	30

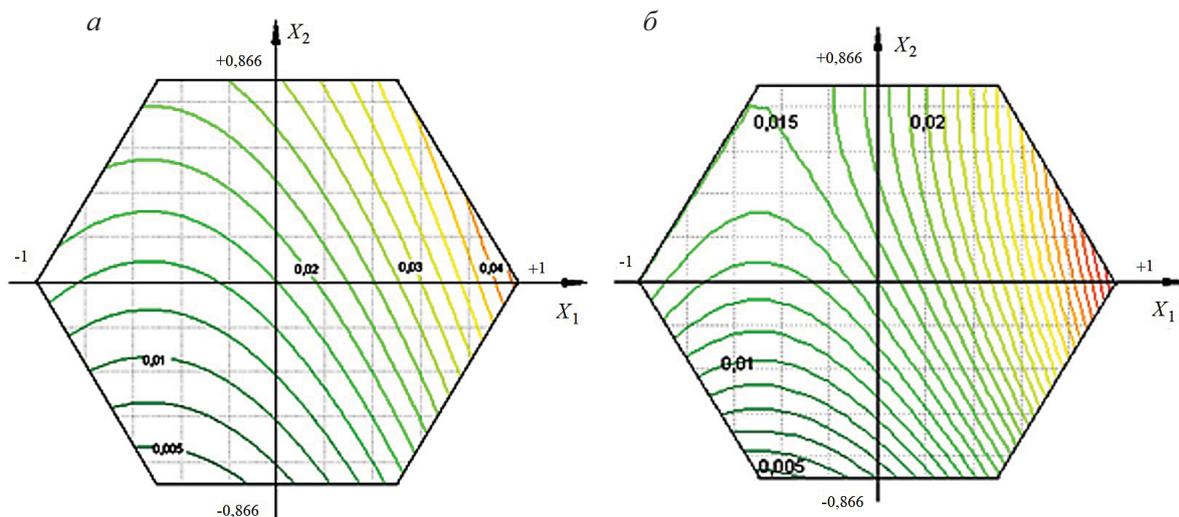


Рис. 4. Линии равного отклика износа колеса (а) и рельса (б)

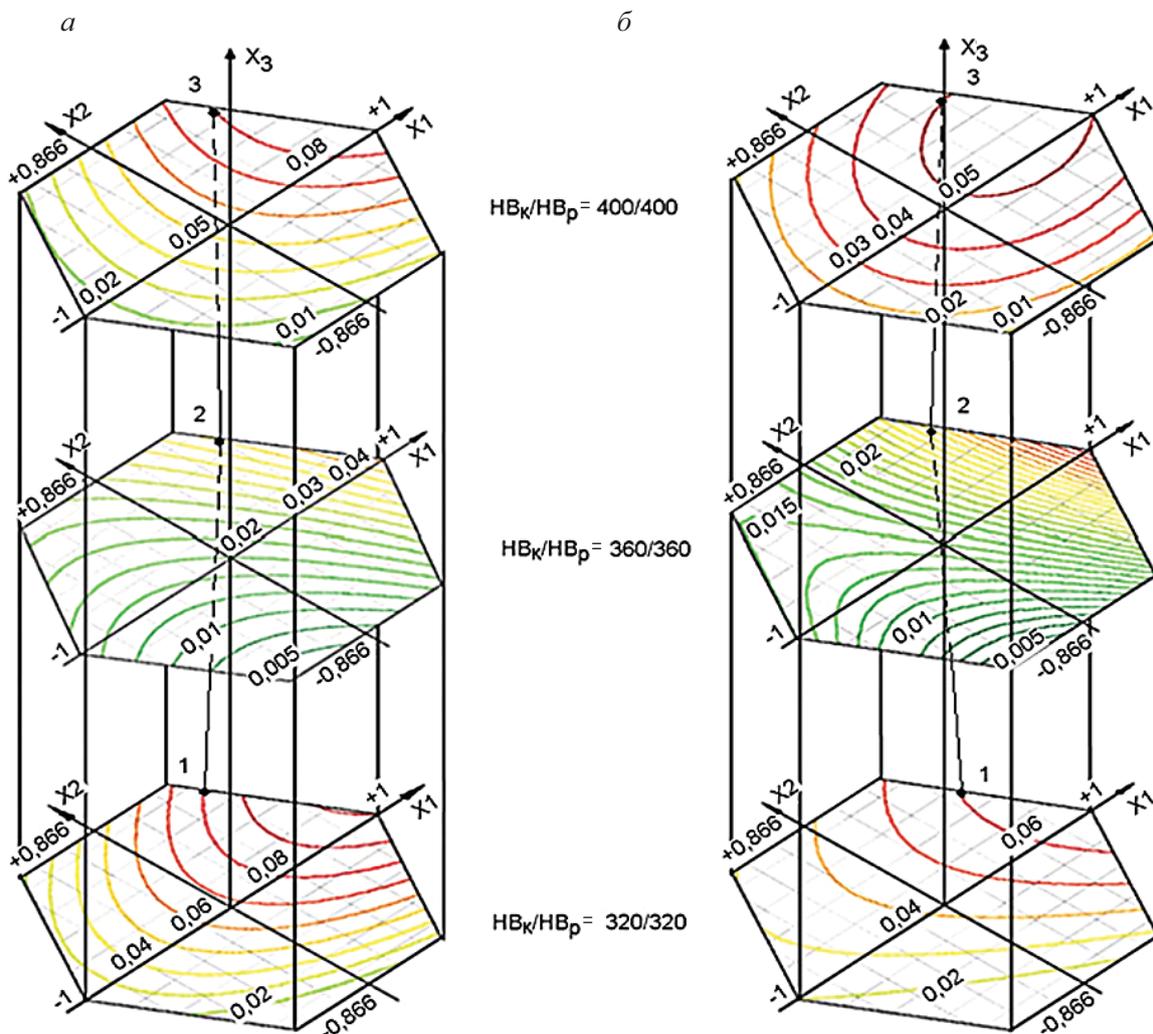


Рис. 5. Модели, иллюстрирующие зависимость минимального износа колеса (а) и рельса (б) от соотношения их твердости

$x_2$  к натуральным величинам осевой нагрузки  $P$  и скорости  $V$ , используя выражения

$$P = 1200 + 780x_1,$$

$$V = 18 + 12x_2.$$

Каждой точке линий соответствует определенное соотношение значений  $P$  и  $V$ . Это дает наглядное описание влияния основных факторов  $P$  и  $V$  на величину износа системы «колесо–рельс». Исходя из вышесказанного, можно подобрать значения  $V$  и  $P$ , обеспечивающие минимальный износ системы «колесо–рельс».

Наименьший износ образца колеса 0,005% (рис. 3, а) получается при  $V = 7,61–9,36$  м/мин с  $P = 732–1098,6$  Н, минимальный износ образца рельса 0,005% (рис. 3, б) при  $V = 7,61–7,68$  м/мин с  $P = 810–966$  Н.

Из данных, представленных на полученной модели равного отклика износа образцов системы «колесо–рельс» (рис. 4 и 5), очевидно, что одна и та же величина износа может соответствовать различным значениям  $P$  и  $V$ , при одной скорости движения может быть различный процент износа, например при  $V = 7,61$  м/мин он по массе равен 0,005; 0,0075; 0,01; 0,0125 и 0,015%; и относительный линей-

ный износ рельса составляет 0,005–0,014 мм с шагом 0,001%.

На рис. 5 изображены правильные шестигранные призмы, объединяющие все полученные экспериментальные данные. На оси  $X_3$  обозначены цифры соотношения твердости пары «колесо–рельс». Эти графические построения позволяют продемонстрировать связь между степенью износа колеса и рельса от  $P$  и  $V$ , а также и от их твердости. С помощью данных моделей можно определить оптимальное соотношение твердости, что приведет к увеличению ресурса пары «колесо–рельс» в зависимости от  $P$  и  $V$ .

Оптимальное соотношение параметров изнашивания в системе «колесо–рельс» (при максимальной нагрузке ( $X_1$ ) и скорости ( $X_2$ )) будет при твердости колеса и рельса 360.

Зависимость изнашивания в системе «колесо–рельс» от соотношения твердости ее элементов представлена на рис. 6. Данные получены по точкам из шестигранных призм при исходном допущении, что величины  $P$  и  $V$  стремятся к максимуму. Кроме того, были экспериментально установлены данные по изнашиванию при неизменных скорости и износе и при минимальных, максимальных их значениях. Износ при соотношении твердости ко-

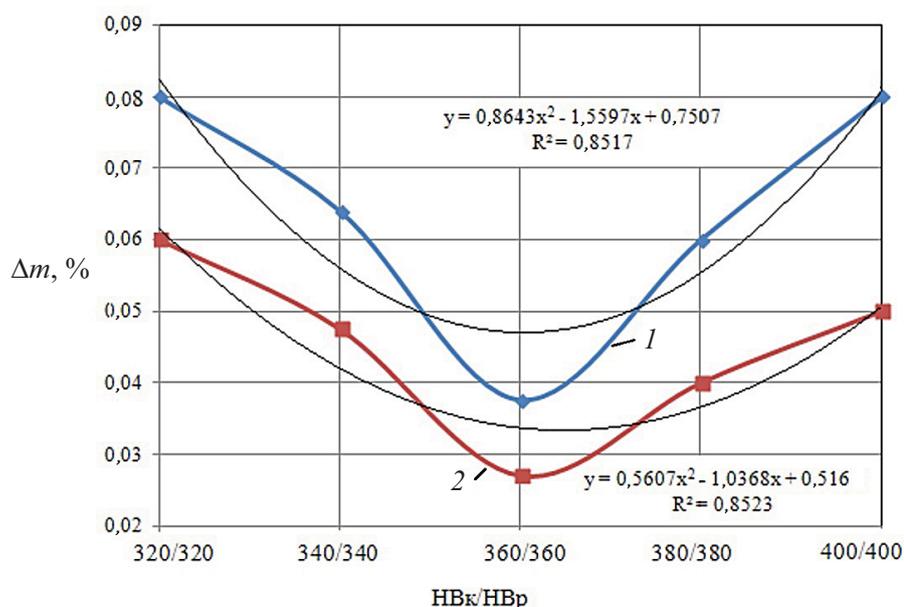


Рис. 6. Зависимость изнашивания колеса (1) и рельса (2) от соотношения их твердости

леса и рельса  $\frac{HB_k}{HB_p} = \frac{320}{320}$  и  $\frac{400}{400}$  больше в 2 раза, чем при соотношении  $\frac{360}{360}$ . При значениях твердости колеса и рельса 320 повышается прочность контактных поверхностей благодаря пластическим деформациям, что сопровождается накоплением в них усталостных повреждений. На отдельных фрагментах зоны контакта поверхностные пленки разрушаются, следствием чего являются схватывание и глубинное разрушение материалов, сопровождающиеся интенсивным процессом. Если твердость колеса и рельса равна 400 и получена при помощи наклёпа, контактные напряжения могут превысить предел контактной выносливости, в результате чего происходит выкрашивание металла [12].

Идентичные результаты – следствие эксперимента при постоянных  $P$  и  $V$ . Полученные соотношения твердости  $\frac{HB_k}{HB_p} = \frac{360}{360}$  и  $\frac{360}{400}$  дают

износ, в 2 раза меньший, чем в случае с применяемым в настоящее время соотношением.

Далее было произведено уточнение полученных экспериментальных данных с помо-

щью интерполяционной зависимости Ньютона для пяти узлов (рис. 7 и 8):

$$P_4(x) = y_0 + \frac{\Delta y_0}{h} \cdot (x - x_0) + \frac{\Delta^2 y_0}{2h^2} \cdot (x - x_0)(x - x_1) + \frac{\Delta^3 y_0}{6h^3} \cdot (x - x_0)(x - x_1)(x - x_2) + \frac{\Delta^4 y_0}{24h^4} \cdot (x - x_0)(x - x_1)(x - x_2)(x - x_3).$$

Выделив величины возможных пар соседних значений функций, в каждом случае вычтем предыдущее значение из последующего и получим конечные разности первого порядка или первые разности:

$$\Delta y_0 = y_1 - y_0, \quad \Delta y_1 = y_2 - y_1, \quad \Delta y_2 = y_3 - y_2,$$

$$\Delta y_i = y_{i+1} - y_i, \quad \Delta y_{n-1} = y_n - y_{n-1}.$$

Аналогично были определены все последующие конечные разности  $n$ -го порядка:

$$\Delta^k y_i = \Delta^{k-1} y_{i+1} - \Delta^{k-1} y_i.$$

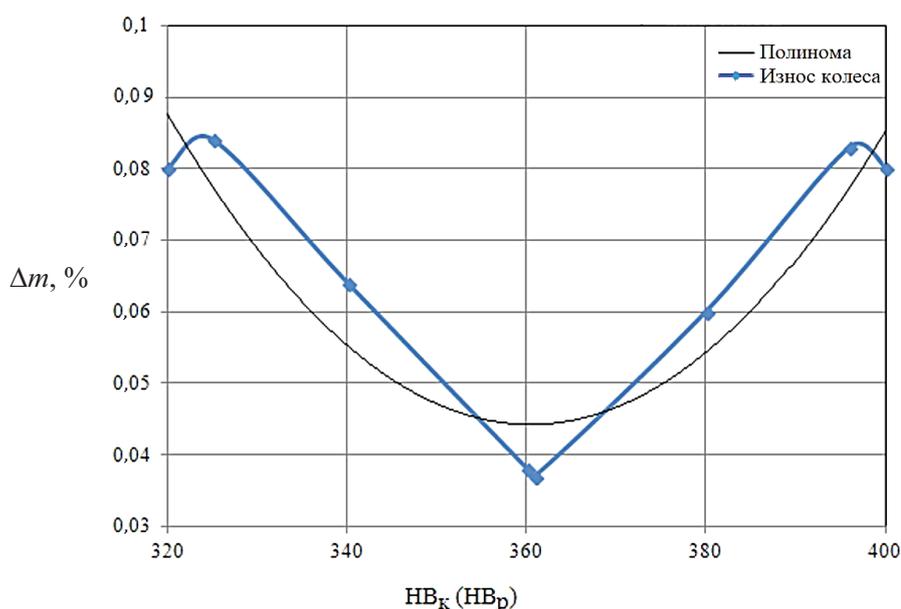


Рис. 7. Зависимость износа колеса от соотношения его твердости и твердости рельса: уравнение регрессии  $y = 3E - 0,5x^2 - 0,0191x + 3,4813$  и интерполяционный многочлен  $R = 0,8659$

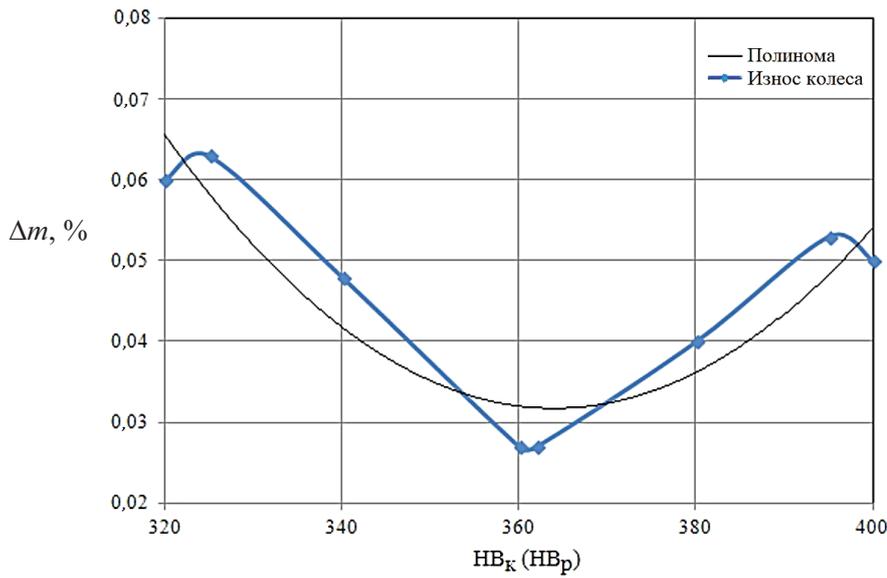


Рис. 8. Зависимость износа рельса от соотношения его твердости и твердости колеса: уравнение регрессии  $y = 3E - 0,5x^2 - 0,0127x + 2,339$  и интерполяционный многочлен  $R = 0,8528$

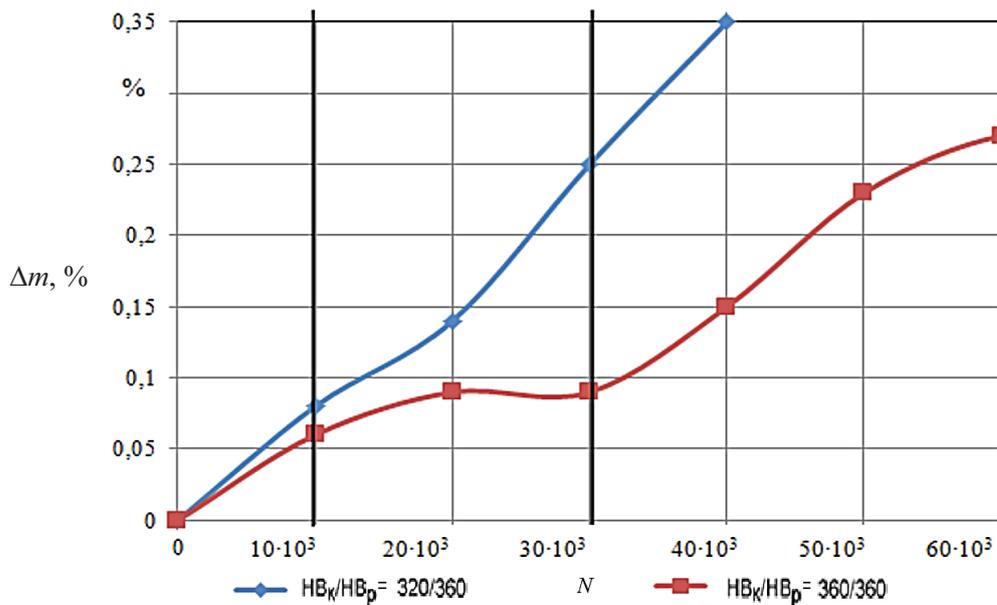


Рис. 9. Испытания колесных образцов до полного разрушения

В случае равноотстоящих узлов с шагом  $h$  раз-  
деленные разности  $n$ -го порядка имеют вид

$$f(x_0; x_1; \dots; x_n) = \frac{\Delta^n y_0}{n! h^n}.$$

Интерполяционный многочлен для ко-  
леса

$$y_a = -2,8906 \cdot 10^{-8} x^4 + 4,1708 \cdot 10^{-5} x^3 - 0,0225x^2 + 5,3744x - 479,8742,$$

для рельса –

$$y_b = -2,0313 \cdot 10^{-8} x^4 + 2,9303 \cdot 10^{-5} x^3 - 0,0158x^2 + 3,7749x - 337,0273.$$

Далее были построены интерполяционные многочлены по рельсу и колесу, а также найдены оптимальные значения для колеса – 361 НВ, для рельса – 362 НВ, следовательно, оптимальное  $\frac{НВ_k}{НВ_p} = 0,997$ , т.е. близкое к единице.

Данные математического анализа шестигранных призм и экспериментально полученных совпадают. Таким образом, при помощи моделей в виде шестигранных призм можно определить минимальные величины износов в системе «колесо–рельс» при различных значениях  $V$  и  $P$ , а также выявить, какому соотношению твердости пары «колесо–рельс» соответствует минимальный износ, позволяющий увеличить ресурс в 1,5–2 раза, что было доказано экспериментально (рис. 9).

Исследование износа колес повышенной твердости в процессе их работы наглядно продемонстрировало неоднозначное влияние твердости на ресурс цельнокатаных колес грузовых вагонов. При увеличении твердости колеса количество таких дефектов как кольцевые выработки, остроконечный накат гребня, тонкий гребень уменьшается, но увеличиваются дефекты по выщербинам и ползунам.

На базе экспериментов, проведенных с парой трения, состоящей из моделей колеса и рельса, были разработаны математические модели, с помощью которых можно прогнозировать ресурс системы «колесо–рельс», и определены оптимальные соотношения твердости колеса и рельса при различных значениях  $V$  и  $P$ .

## Библиографический список

1. Воробьев А. А. Совершенствование технологии восстановления колесных пар повышенной твердости : дис. ... канд. техн. наук, специальность : 05.22.07 / А. А. Воробьев. – СПб. : ПГУПС, 2005. – 180 с.

2. Ларин Т. В. Об оптимальной твердости элементов пары трения «колесо–рельс» / Т. В. Ларин // Вестн. ВНИИЖТ. – 1965. – № 3. – С. 5–9.

3. ГОСТ 18267–82. Рельсы железнодорожные типов Р50, Р65 и Р75 широкой колеи, термообработанные путем объемной закалки в масле. Технические условия. – М. : Изд-во стандартов, 1989. – 15 с.

4. ГОСТ 10791–2004. Колеса цельнокатаные. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2004. – 27 с.

5. ГОСТ 398–2010. Бандажи черновые для железнодорожного подвижного состава. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2011. – 10 с.

6. Патент № 98070 Российская Федерация, МПК G 01 М 17/10. Устройство для имитации процесса движения колеса по рельсу / А. А. Ражковский, А. Г. Петракова, Т. Г. Бунькова ; заявитель и патентообладатель Омск. гос. ун-т путей сообщения. – № 2010118122/11. – Заявл. 05.05.2010 г. ; опубл. 27.09.2010 г. – Бюл. № 27.

7. ГОСТ Р 51685–2000. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия. – М. : Стандартинформ, 2000. – 22 с.

8. ГОСТ 10791–2011. Колеса цельнокатаные. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2011. – 27 с.

9. Бунькова Т. Г. Выбор оптимального соотношения твердости цельнокатаного колеса грузового вагона и железнодорожного рельса / Т. Г. Бунькова // Дизайн и технологии. – 2012. – № 28. – С. 102–110.

10. Патент № 113839 Российская Федерация, МПК G 01 М 17/10. Устройство для имитации процесса нагружения колеса на рельс / А. А. Ражковский, А. Г. Петракова, Т. Г. Бунькова ; заявитель и патентообладатель Омск. гос. ун-т путей сообщения. – № 2011131543/11. – Заявл. 27.07.2011 г. ; опубл. 27.02.2012 г. – Бюл. № 6.

11. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании и оптимизации технологических процессов : учеб. пособие / А. А. Спиридонов, Н. Г. Васильев. – Свердловск : Изд-во УПИ им. С. М. Кирова, 1975. – 140 с.

12. Крагельский И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский. – М. : Машиностроение, 1968. – 480 с.

## References

1. Vorobyev A. A. *Sovershenstvovanie tekhnologii vosstanovleniia kolesnykh par povyshennoi tverdosti* [Perfecting the technology for restoring wheel

*pairs of increased hardness*]. Dis. Cand. Eng. Sci., speciality: 05.22.07. Saint Petersburg, Petersburg State Transport University Publ., 2005, 180 p. (In Russian)

2. Larin T. V. Ob optimalnoi tverdosti elementov pary treniia “koleso–rels” [On the best hardness ratio of “wheel–rail” friction pair elements]. *Vestnik VNII-ZhT* [Processing of Railway Research Institute Herald], 1965, no. 3, pp. 5–9. (In Russian)

3. GOST 18267–82. *Rel'sy zheleznodorozhnye tipov R50, R65 i R75 shirokoi kolei, termoobrabotannye putem ob'emnoi zakalki v masle. Tekhnicheskie usloviia* [State standard GOST 18267–82. Broad-gauge railway rails of R50, R65 and R75 types heat-treated by bulk oil hardening method. Technical conditions]. Moscow, Standart Publ., 1989, 15 p. (In Russian)

4. GOST 10791–2004. *Kolesa tsel'nokatanye. Tekhnicheskie usloviia* [State standard GOST 10791–2004. Solid-rolled wheels. Technical conditions]. Moscow, Standartinform Publ., 2004, 27 p. (In Russian)

5. GOST 398–2010. *Bandazhi chernovye dlia zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Tekhnicheskie usloviia* [State standard GOST 398–2010. Intermediate wheel bands for railway rolling stock. Technical conditions]. Moscow, Standartinform Publ., 2011, 10 p. (In Russian)

6. Razhkovskii A. A., Petrakova A. G. & Bunkova T. G. *Ustroistvo dlia imitatsii protsessa dvizheniia kolesa po rel'su* [Installation for imitation of the process of movement of wheel on rail]. Patent N 98070. Russian Federation, MPK G 01 M 17/10. Patent applicant and holder Omsk State Transport University. Declared 05.05.2010; published 27.09.2010. Bull. no. 27. (In Russian)

7. GOST R 51685–2000. *Relsy zheleznodorozhnye. Obshchie tekhnicheskie usloviia* [State standard GOST R 51685–2000. Railway rails. General technical conditions]. Moscow, Standartinform Publ., 2000, 22 p. (In Russian)

8. GOST 10791–2011. *Kolesa tsel'nokatanye. Tekhnicheskie usloviia* [State standard GOST 10791–2011. Solid-rolled wheels. Technical conditions]. Moscow, Standartinform Publ., 2011, 27 p. (In Russian)

9. Bunkova T. G. Vybor optimal'nogo sootnosheniia tverdosti tselnokatanogo kolesa gruzovogo vagona i zheleznodorozhnogo relsa [Selection of best hardness ratio for solid-rolled cargo wagon wheel and railway rail]. *Dizain i tekhnologii* [Design and technologies], 2012, no. 28, pp. 102–110. (In Russian)

10. Razhkovskii A. A., Petrakova A. G. & Bunkova T. G. *Ustroistvo dlia imitatsii protsessa dvizheniia kolesa po rel'su* [Installation for imitation of the process of loading of wheel on rail]. Patent N 113839. Russian Federation, MPK G 01 M 17/10. Patent applicant and holder Omsk State Transport University. Declared 27.07.2011; published 27.02.2012, bull. no. 6. (In Russian)

11. Spiridonov A. A. & Vasilyev N. G. *Planirovanie eksperimenta pri issledovanii i optimizatsii tekhnologicheskikh protsessov* [Planning of experiment in studying and optimization of technological processes]. Study guide. Sverdlovsk, Kirov Urals Polytechnical University Publ., 1975, 140 p. (In Russian)

12. Kragel'skii I. V. *Trenie i iznos* [Friction and wear]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968, 480 p. (In Russian)]

\*ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич – канд. техн. наук, доцент, 89219751198@yandex.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); БУНЬКОВА Тамара Геннадьевна – преподаватель, bunkovatg@mail.ru (Омский государственный университет путей сообщения); СОБОЛЕВ Александр Альбертович – канд. техн. наук, доцент, a89213194387@yandex.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 004+656.21+65.011.56

**В. А. Грошев****К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА СТАНЦИЯХ**

Дата поступления: 27.11.2018

Решение о публикации: 06.02.2019

**Аннотация**

**Цель:** Проанализировать исследования в области моделирования работы железнодорожного транспорта, проведенные в последнее десятилетие и посвященные технологическим процессам. Выявить и классифицировать их основные направления. **Методы:** Проведен сравнительный анализ методов, применяемых для моделирования технологического процесса работы железнодорожных станций. **Результаты:** Сформулирована обобщенная классификация направлений исследований. Определены их основные цели и математический аппарат. Отмечены способы практического применения результатов. Выявлены возможные цели и направления перспективных исследований. **Практическая значимость:** Полученные результаты могут быть использованы для ознакомления с существующими направлениями в области моделирования технологических процессов работы железнодорожных станций и развития перспективных.

**Ключевые слова:** Технологический процесс, моделирование процессов, работа станций, научные исследования, перспективные направления, автоматизация работы.

**Vasilii A. Groshev**, assistant, was.groshev@yandex.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) ON THE PROBLEM OF SIMULATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AT STATIONS. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-1-87-94

**Summary**

**Objective:** To analyse research in the field of simulation of rail transport operation, conducted over the last 10 years and devoted to technological processes, and identify and classify their main directions. **Methods:** Comparative analysis of the methods used to simulate the technological process of railway station operation was undertaken. **Results:** A generalised classification of research areas has been formulated, their main objectives and mathematical apparatus identified. The methods of practical application of research results are noted. Possible goals objectives and directions of prospective studies identified. **Practical importance:** The obtained results can be used for familiarisation with existing areas in the field of simulation of technological processes of railway stations, and contribute to development of promising ones.

**Keywords:** Technological process, process simulation, station operation, research, promising areas, automation.

**Введение**

Нестабильность перевозочного процесса ведет к необходимости адаптации системы управления к изменяющимся условиям. Важную роль в этом играют техническое обеспе-

чение для получения достоверной, полной информации и быстрая оценка альтернативных вариантов развития событий. Также следует отметить, что устойчивость перевозочного процесса зависит от последствий отказов и надежности работы всех элементов системы

управления. В то же время развитие вычислительной техники способствует стремительному росту их производительности и обуславливает использование в различных сферах хозяйственной деятельности, включая прогнозирование ситуаций, планирование действий и формирование вариантов, для чего зачастую применяют моделирование технологических процессов.

Все вышесказанное послужило основанием для проведения исследований, посвященных вопросам моделирования работы железнодорожного транспорта [1, 2].

В данной статье сделана попытка систематизировать и классифицировать работы за период 2005–2018 гг. по направлениям деятельности, решаемым задачам и применяемым методам. При этом проводился сравнительный анализ трудов, связанных с железнодорожным транспортом, а именно с моделированием технологических процессов станций. Настоящая работа посвящена моделированию технологических процессов станций и не охватывает модели сетевого уровня (работа участков и направлений) и линейных подразделений (рис. 1). На рис. 1 [3] представлена обобщенная система классификации технологических процессов на железнодорожном транспорте.

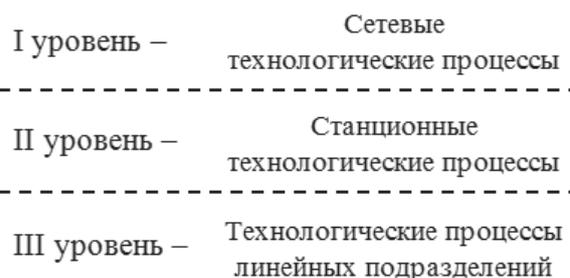


Рис. 1. Классификация технологических процессов

### Тенденции моделирования технологических процессов работы железнодорожного транспорта

В исследованиях, посвященных технологическим процессам работы железнодорожных станций, можно выделить следующие направления научных изысканий (таблица) в зависимости от практической направленности результатов:

- структура и организация технологического процесса [4, 5];
- разработка моделей станционного технологического процесса [6–8];
- применение моделей технологического процесса [9–11].

#### Направления исследований технологического процесса станций

Направление	Основной вопрос	Основной математический аппарат
Структура и организация технологического процесса	Из чего состоит технологический процесс работы станции, как взаимодействуют элементы	Системный анализ, исследование операций, теория алгоритмов, многокритериальная оценка, теория вероятности, математическая статистика
Разработка моделей технологического процесса	Как отобразить работу станции с помощью вычислительной техники	Системный анализ, исследование операций, теория вероятности, теория графов, математический аппарат моделирования, математическая статистика
Применение моделей технологического процесса	В каких сферах и для каких целей возможно применение моделей технологического процесса работы станции	Теория случайных процессов, теория множеств, теория управления, моделирование, теория принятия решений

Работы, посвященные вопросам *структуры и организации технологического процесса*, позволяют выявить и формализовать факторы, влияющие на организацию и характер взаимодействия между различными элементами технологического процесса, включая деятельность оперативного персонала, что необходимо учитывать при разработке модели технологического процесса.

В работах этого направления изучаются такие вопросы как наиболее оптимальное распределение зон управления на станции и распределение функций, выполняемых оперативным персоналом станции. Проводится оценка алгоритмов действий работников в тех или иных ситуациях, поднимается вопрос целесообразности ввода дополнительного работника той или иной квалификации, рассматриваются вопросы их взаимодействия.

Основным математическим аппаратом данного направления являются методы системного анализа и исследования операций, теория алгоритмов, многокритериальная оценка, теория вероятности, математическая статистика.

К работам, проведенным в этой области, относится диссертация К. Е. Ковалева [4]. Она посвящена вопросам распределения зон управления между оперативным персоналом крупных участковых станций, вопросу распределения функций между работниками. В ней изучаются организационные вопросы: конфигурация зон ответственности, ввод дополнительного работника (оператор или дежурный по станции – ДСП) и распределение функций, представлено алгоритмическое описание работы оперативного персонала, предложен критерий оценки его загруженности. Отмечено, что почти 75 % времени ДСП тратит на переговоры по технологической связи, ввод и считывание информации.

Примером практического результата исследований этого направления является обоснование конфигурации аппаратных средств управления релейной системой электрической централизации станции.

В работах, посвященных вопросам *моделирования стационарных технологических процессов*, оцениваются структура модели, ее поведение в различных ситуациях и техническая реализация. К ним можно отнести работы по применению различных технологий моделирования (имитационного моделирования, сетевых моделей, моделей потоков данных и т. д.) для описания деятельности объекта. В основном в них пытаются ответить на вопрос «как построить модель?». При этом тип станции (участковая, сортировочная, узловая) не имеет решающего значения.

Основным математическим аппаратом работ такого направления являются системный анализ, теория вероятности, статистика, математический аппарат искусственных нейронных сетей, исследования операций, теория графов, объектно-ориентированный анализ.

В качестве примера работ можно указать [6, 7].

В работе [7] рассматривается возможность применения нейросетевых моделей для повышения качества решений, принимаемых оперативным персоналом сортировочной станции. При этом модель строится на основе трех нейросетевых моделей, решающих четко определенные задачи. Кроме того, в [7] исследованы вопросы организации взаимодействия между элементами технологического процесса станции.

В работе [6] описывается внедрение модели технологического процесса работы станции в интеллектуальную систему управления, построенную на основе микропроцессорных систем централизации. В основе реализации модели лежит использование двух блоков – блока планирования и блока формирования задач. Также сформулированы основные требования к функциям, выполняемым моделью:

- автоматическое определение задачи для реализации графика движения поездов и выполнения внутростанционного технологического процесса;

- оперативное планирование работ в соответствии с поставленными целями;

– осуществление поддержки принятия решений.

Работы, посвященные *применению моделей технологического процесса*, показывают актуальность исследований технологического процесса и возможность применения их результатов в повседневной деятельности, которая достаточно обширна: начиная от подготовки специалистов до решения повседневных задач оперативной деятельности.

Основным математическим аппаратом проведенных исследований являются: аппарат оптимизации, теория случайных процессов, теория множеств, теория управления, имитационное моделирование, теория принятия решений, теория моделирования сложных транспортных систем, теория надежности.

Например, в [9] рассмотрена возможность использования модели работы станции для повышения функциональной надежности железнодорожных станций при технологических сбоях. Определены границы технологических сбоев, приводящие к снижению функциональной надежности станции. Показано, как негативные последствия сбоев могут быть минимизированы (локализованы) путем согласования технологии работы станции и ее структуры при помощи модели технологического процесса.

В [10] продемонстрированы подходы к оценке результатов моделирования параметров технологического процесса. Выявлены ограничения использования результатов моделирования в ходе оперативной деятельности, сделан вывод о необходимости их дополнения опытом человека для их оценки.

В [11] рассмотрены модели технологического процесса станции для подготовки оперативного персонала. На основе недостатков существующих подходов к решению задач управления определено, что следует развивать подготовку специалистов. С этой целью в работе описаны методы повышения качества принимаемых решений через повышение квалификации оперативного персонала.

## **Развитие методов моделирования технологического процесса работы станции**

Основным недостатком представленных направлений исследований является отсутствие решения задач, связанных с планированием работы станции. Все предложенные комплексы моделируют работу станции при заданной статичной ситуации, которая может характеризоваться нормальным ходом технологического процесса или сбоем в результате какого-либо события. В случае нарушения технологического процесса работа станции моделируется с целью определения степени деградации эксплуатационных показателей, а не поиска возможных путей для достижения целевых значений. Работа моделей сводится к оценке степени отклонения хода технологического процесса от плана. Однако в ходе работы станции важно ответить на вопрос «что делать», когда в технологическом процессе произошел сбой. Для этого необходимо знать, к чему стремиться, т.е. фактически иметь возможность для системы решать задачи выбора целей и формирования плана по их достижению, что относится к сфере планирования.

В свою очередь, основой планирования являются информация о текущем положении дел и своевременное поступление извещений об изменениях. Учитывая динамичный характер протекания процесса работы станции, фактически планирование должно вестись в режиме реального времени с учетом изменения информации о ходе технологического процесса, поступающей также в режиме реального времени.

Решение задачи планирования создает предпосылки повышения уровня автоматизации управления работой станции [12–14], которое позволит реализовать программное управление ею.

В настоящее время многие элементы контура управления [15] не формализованы и находятся вне программно-аппаратных средств управления перевозочным процессом (рис. 2, а). Отдельно стоит отметить, что

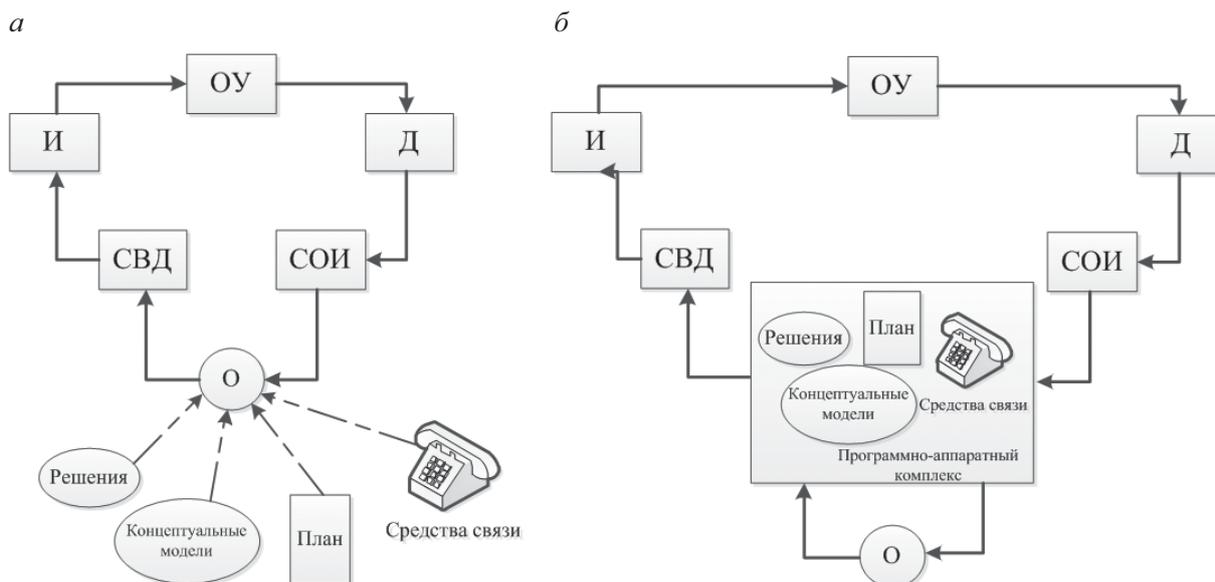


Рис. 2. Существующий контур управления работой станции (а) и новой степени автоматизации (б):  
 ОУ – объект управления, Д – датчики, СОИ – система отображения информации,  
 О – оператор, СВД – система ведения диалога, И – интерфейс сопряжения

такие элементы как концептуальные модели и решения во многом зависят от опыта, уровня профессиональной подготовки и качеств характера оператора.

Переход на новую степень автоматизации управления работой станции возможен, когда эти элементы будут максимально реализованы программно-аппаратными средствами (рис. 2, б). Это позволит ввести автоматический режим работы без участия человека на спланированный вычислительной машиной период (2–3 ч) по плану, подтвержденному ДСП. В таком случае решение оператора будет необходимо только в случае внештатных ситуаций, когда система неспособна самостоятельно сделать выбор возможной альтернативы.

## Заключение

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что сфера моделирования технологического процесса работы железнодорожных станций до конца не изучена. Основное внимание было уделено применению готовых моделей. При этом основным их

видом в исследованиях приняты имитационные и интерактивные модели. В то же время другим видам моделей (например, нейросетевым) не уделено достаточное внимание. Также не получил должного рассмотрения вопрос использования результатов моделирования для управления технологическим процессом станции в режиме реального времени.

## Библиографический список

1. Шухина Е. Е. Алгоритмы повышения пропускной способности железнодорожных участков и их реализация в ИСУЖТ / Е. Е. Шухина, В. И. Астрахан, В. М. Малинов, Б. Г. Цукерман // Труды Второй науч.-технич. конференции «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте (ИСУЖТ–2013)». – М. : НИИАС, 2013. – С. 65–68.
2. Ерёмин А. С. Актуальные вопросы использования мультиагентных технологий при разработке графика движения поездов / А. С. Ерёмин, О. В. Ефремов // Труды Шестой науч.-технич. конференции «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ–2017)». – М. : НИИАС, 2017. – С. 53–55.

3. Грошев В. А. Технологический процесс на железных дорогах / В. А. Грошев // Межвуз. науч.-теоретич. конференция «Инновационная железная дорога. Новейшие и перспективные системы обеспечения движения поездов»: сб. статей / под общ. ред. А. С. Шарлая. – Петергоф : ВИ (ЖДВ и ВОСО), 2017. – С. 42–44.

4. Ковалев К. Е. Метод распределения функций и зон управления между оперативным персоналом крупных участковых станций : дис. ... канд. техн. наук, специальность : 05.22.08 / К. Е. Ковалев. – СПб. : ПГУПС, 2015. – 194 с.

5. Филиппов А. Г. Обоснование этапности развития узловых железнодорожных станций : дис. ... канд. техн. наук, специальность : 05.22.08 / А. Г. Филиппов. – СПб. : ПГУПС, 2018. – 158 с.

6. Кучумов Р. В. Автоматизация оперативного управления движением поездов на железнодорожных станциях : дис. ... канд. техн. наук, специальность : 05.22.08 / Р. В. Кучумов. – СПб. : ПГУПС, 2009. – 252 с.

7. Обухов А. Д. Разработка комплекса нейросетевых моделей управления оперативной работой сортировочной станции : дис. ... канд. техн. наук, специальность : 05.22.08 / А. Д. Обухов. – СПб. : ПГУПС, 2016. – 146 с.

8. Осокин О. В. Интеллектуальное сопровождение производственных процессов на железнодорожном транспорте : дис. ... д-ра техн. наук, специальность : 05.22.08 / О. В. Осокин. – Екатеринбург : УрГУПС, 2014. – 355 с.

9. Тимухина Е. Н. Повышение функциональной надежности железнодорожных станций при технологических сбоях : дис. ... д-ра техн. наук, специальность : 05.22.08 / Е. Н. Тимухина. – Екатеринбург : УрГУПС, 2012. – 384 с.

10. Кашеева Н. В. Интерактивное исследование железнодорожных станций : дис. ... канд. техн. наук, специальность : 05.22.08 / Н. В. Кашеева. – Екатеринбург : УрГУПС, 2015. – 140 с.

11. Чернышев К. А. Построение интеллектуальных интерактивных систем для оптимизации станционного управления : дис. ... канд. техн. наук, специальность : 05.22.08 / К. А. Чернышев. – М. : МИИТ, 2016. – 146 с.

12. Никитин А. Б. Методы и технические средства концентрации и централизации оперативного

управления движением поездов : Развитие теории и практические приложения : дис. ... д-ра техн. наук, специальность : 05.22.08 / А. Б. Никитин. – СПб. : ПГУПС, 2005. – 326 с.

13. Балугев Н. Н. Автоматизация оперативного управления перевозочным процессом на станциях в компьютерных системах электрической централизации / Н. Н. Балугев, Г. Ф. Насонов, А. Б. Никитин, В. В. Моисеев, В. А. Грошев // Интеллектуальные системы на транспорте : материалы Третьей междунар. науч.-практич. конференции «ИнтеллектТранс-2013». – М. : Перо, 2013. – С. 8–12.

14. Корниенко А. А. Интеллектуальные компьютерные системы оперативного управления движением поездов на станциях / А. А. Корниенко, А. Б. Никитин, А. Д. Хомоненко // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2012. – Вып. 2 (31). – С. 116–119.

15. Сапожников Вл. В. Микропроцессорные системы централизации : учебник для техникумов и колледжей железнодорожного транспорта / Вл. В. Сапожников, В. А. Кононов, С. А. Куренков, А. А. Лыков, О. А. Наседкин, А. Б. Никитин, А. А. Прокофьев, М. С. Трясов ; под ред. Вл. В. Сапожникова. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2008. – 398 с.

## References

1. Shukhina E. E., Astrakhan V. I., Malinov V. M. & Tsukerman B. G. Algoritmy povysheniia propusknoi sposobnosti zheleznodorozhnykh uchastkov [Algorithms for increasing train-handling capacity of railway sections and their implementation in the intelligent control systems for railway transport]. *Trudy II nauch.-prakt. konf. "Intellektual'nye sistemy upravleniia na zheleznodorozhnom transporte ISUZhT-2013"* [Proc. of the 2nd sci. and technical conf. "Intelligent control systems for railway transport ISUZhT-2013"]. Moscow, Russian Research and Design Inst. for Information Technology, Signalling and Telecommunications in Railway Transportation (NIAS) Publ., 2013, pp. 65–68. (In Russian)

2. Eremin A. S. & Efremov O. V. Aktual'nye voprosy ispol'zovaniia mul'tiagentnykh tekhnologii pri razrabotke grafika dvizheniia poezdov [Topical is-

sues in the use of multi-agent technologies in the development of train movement schedules]. *Trudy VI nauch.-prakt. konf. "Intellektual'nye sistemy upravleniia na zheleznodorozhnom transporte. Komp'iuternoe i matematicheskoe modelirovanie (ISUZhT-2017)"* [Proc. of the 6th sci. and technical conf. "Intelligent control systems for railway transport. Computer and mathematical simulation (ISUZhT-2017)"]. Moscow, Russian Research and Design Inst. for Information Technology, Signalling and Telecommunications in Railway Transportation (NIIAS) Publ., 2017, pp. 53–55. (In Russian)

3. Groshev V. A. Tekhnologicheskii protsess na zheleznykh dorogakh [Technological process on railways]. *Mezhvuzovskaia nauch.-teor. konf. "Innovatsionnaia zheleznaia doroga. Noveishie i perspektivnye sistemy obespecheniia dvizheniia poezdov"* [Proc. of the inter-university sci. and theor. conf. "Innovative railway. The newest and promising systems of train traffic"]. Coll. papers. Ed. by A. S. Sharlai. Peterhof, Military Institute of Rail Troops and Military Communications Publ., 2017, pp. 42–44. (In Russian)

4. Kovalev K. E. *Metod raspredeleniia funktsii i zon upravleniia mezhdu operativnym personalom krupnykh uchastkovykh stantsii* [Method of distribution of functions and administration zones between operation personnel of large local stations]: diss. Cand. Eng. Sci., speciality: 05.22.08. Saint Petersburg, Petersburg State Transport University Publ., 2015, 194 p. (In Russian)

5. Filippov A. G. Obosnovanie etapnosti razvitiia uzlovykh zheleznodorozhnykh stantsii [The rationale for phasing the development of junction railway stations]: diss. Cand. Eng. Sci., speciality: 05.22.08. Saint Petersburg, Petersburg State Transport University Publ., 2018, 158 p. (In Russian)

6. Kuchumov R. V. *Avtomatizatsiia operativnogo upravleniia dvizheniem poezdov na zheleznodorozhnykh stantsiiakh* [Automation of operational control of train traffic at railway stations]: diss. Cand. Eng. Sci., speciality: 05.22.08. Saint Petersburg, Petersburg State Transport University Publ., 2009, 252 p. (In Russian)

7. Obukhov A. D. *Razrabotka kompleksa neirosetyvykh modelei upravleniia operativnoi raboty sortirovochnoi stantsii* [Development of a set of neural network models for control of a sorting station's operational work]: diss. Cand. Eng. Sci., speciality: 05.22.08. Saint Petersburg, Petersburg State Transport University Publ., 2016, 146 p. (In Russian)

8. Osokin O. V. *Intellektual'noe soprovozhdenie proizvodstvennykh protsessov na zheleznodorozhnom transporte* [Intelligent maintenance of production processes on railway transport]: diss. Dr. Eng. Sci., speciality: 05.22.08. Yekaterinburg, Ural State University of Railway Transport Publ., 2014, 355 p. (In Russian)

9. Timukhina E. N. *Povyshenie funktsional'noi nadezhnosti zheleznodorozhnykh stantsii pri tekhnologicheskikh sboiakh* [Improving the functional reliability of railway stations in case of technological failures]: diss. Dr. Eng. Sci., speciality: 05.22.08. Yekaterinburg, Ural State University of Railway Transport Publ., 2012, 384 p. (In Russian)

10. Kashcheeva N. V. *Interaktivnoe issledovanie zheleznodorozhnykh stantsii* [Interactive study of railway stations]: diss. Cand. Eng. Sci., speciality: 05.22.08. Yekaterinburg, Ural State University of Railway Transport Publ., 2015, 140 p. (In Russian)

11. Chernyshev K. A. *Postroenie intellektual'nykh interaktivnykh sistem dlia optimizatsii stantsionnogo upravleniia* [Building intelligent interactive systems to optimise station management]: diss. Cand. Eng. Sci., speciality: 05.22.08. Moscow, Russian University of Transport (MIIT) Publ., 2016, 146 p. (In Russian)

12. Nikitin A. B. *Metody i tekhnicheskie sredstva kontsentratsii i tsentralizatsii operativnogo upravleniia dvizheniem poezdov. Razvitie teorii i prakticheskie prilozheniia* [Methods and technical tools for concentration and interlocking of operational control of trains. Development of theory and practical application]: diss. Dr. Eng. Sci., speciality: 05.22.08. Saint Petersburg, Petersburg State Transport University Publ., 2005, 326 p. (In Russian)

13. Baluev N. N., Nasonov G. F., Nikitin A. B., Moiseev V. V. & Groshev V. A. *Avtomatizatsiia operativnogo upravleniia perevochnym protsessom na stantsiiakh v komp'iuternykh sistemakh elektricheskoi tsentralizatsii* [Automation of transportation processes' operating control at stations in electric interlocking computer systems]. *Intellektual'nye sistemy na transporte. Materialy III mezhdunarodnoi nauch.-prakt. konferentsii "IntellektTrans-2013"* [Intelligent systems in transport. Proc. of the 3rd Intl. conf. "IntellectTrans-2013"]. Moscow, Pero Publ., 2013, pp. 8–12. (In Russian)

14. Kornienko A. A., Nikitin A. B. & Khomonenko A. D. *Intellektual'nye komp'iuternye sistemy*

operativnogo upravleniia dvizheniem poezdov na stantsiiakh [Intelligent computer-based systems of train movement operational control at stations]. *Izvestiya Peterb. Universiteta putei soobshcheniia* [Proc. of Petersburg Transport University]. Saint Petersburg, Petersburg State Transport University Publ., 2012, issue 2 (31), pp. 116–119. (In Russian)

15. Sapozhnikov V. V., Kononov V. A., Kurenkov S. A., Lukov A. A., Nasedkin O. A., Nikitin A. B., Prokofiev A. A., Triasov M. S. *Mikroprotsessornye sistemy tsentralizatsii* [Microprocessor-based interlocking systems]. Textbook for railway transport technical high schools and colleges. Ed. by V. V. Sapozhnikov. Moscow, Training Centre for Railway Transport Education Publ., 2008, 398 p. (In Russian)

ГРОШЕВ Василий Александрович – ассистент, was.groshev@yandex.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 628.3

**В. Г. Иванов, Н. А. Черников, Н. В. Твардовская****ИНТЕНСИВНОСТЬ РАСЧЕТНЫХ ДОЖДЕЙ И АНАЛИЗ СООТНОШЕНИЯ  
ОБЪЕМОВ ДОЖДЕВОЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СТОЧНОЙ ВОДЫ  
ДЛЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ СИБИРСКОГО  
И ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО РЕГИОНОВ РОССИИ**

Дата поступления: 10.12.2018

Решение о публикации: 06.02.2019

**Аннотация**

**Цель:** Определить для Сибирского и Дальневосточного регионов РФ надежные и доступные для проектных организаций значения интенсивности расчетных дождей (т. е. дождей, на сток от которых производится расчет элементов системы канализации) без сложной и трудоемкой обработки многолетних данных метеостанций и обоснованно оценить объемы дождевого стока, направляемого на очистку. **Методы:** Используются методы экстраполяции аппроксимации дождей средней и большой интенсивности и математического моделирования выпадения дождей для построения карт изолиний расчетных дождей и аналитическим путем выводятся количественные соотношения расходов дождевых и производственных сточных вод, обосновывается перспектива технологии их совместной очистки. **Результаты:** Впервые составлены аппроксимирующие зависимости значений интенсивности малых дождей при периоде однократного превышения расчетной интенсивности дождя  $P = 0,05$  и  $0,1$  года, рекомендуемые строительными правилами для определения объемов дождевого стока. Получены параметры интенсивности расчетных дождей для железнодорожных станций Сибирского и Дальневосточного регионов РФ, существенно облегчающие процесс проектирования. Проведена оценка достоверности аппроксимации. Выведены зависимости для нахождения соотношения объемов стока, направляемого на очистку, для участковых железнодорожных станций в зависимости от их грузонапряженности. Установлено, что в пределах Сибирского и Дальневосточного регионов РФ расчетные расходы дождевых стоков на транспортных предприятиях при прочих равных условиях могут отличаться в 6 раз. **Практическая значимость:** Уточнены объемы дождевого стока для железных дорог Сибири и Дальнего Востока с учетом местоположения объекта проектирования. Анализ полученных результатов показывает, что для этой части территории РФ интенсивность расчетных дождей при  $P = 0,1$  года составляет 4,5–26,2 мм, а при  $P = 0,05$  года – 3,3–22,9 мм в зависимости от местоположения объекта, а при проектировании часто принимается произвольно в диапазоне 5–10 мм, что приводит к значительным погрешностям. Это позволяет с минимальными затратами времени и средств обоснованно определять направляемые на очистку объемы дождевого стока и дает представление об истинном соотношении производственных и дождевых сточных вод, что существенно влияет на выбор метода и технологической схемы их очистки.

**Ключевые слова:** Интенсивность расчетного дождя, соотношение объемов дождевых и производственных стоков, экстраполяционный метод.

**Viktor G. Ivanov**, D. Eng. Sci., professor, 4578304@mail.ru; **Nikolai A. Chernikov**, D. Eng. Sci., professor, nika\_pgups@mail.ru; **\*Nadezhda V. Tvardovskaia**, Cand. Eng. Sci., associate professor, tvardov\_nv@mail.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) INTENSITY OF CALCULATION RAINS AND THE ANALYSIS OF THE RATIO OF VOLUMES OF RAIN AND INDUSTRIAL WASTE WATER FOR RAILWAY STATIONS OF THE SIBERIAN AND FAR EASTERN REGIONS OF RUSSIA. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-1-95-104

## Summary

**Objective:** To determine values of intensity of calculation rains, i. e. rain volumes to be used for calculation of elements of the storm water drainage systems, for the Siberian and Far Eastern regions of the Russian Federation, reliable and available to the project organizations, without difficult and labour-consuming processing of long-term meteorological stations' data, and reasonable approximation of volumes of storm water drainage directed to purification. **Methods:** Methods of extrapolation approximation of rains of mid- to high intensity and mathematical simulation of rain fall are used for generating isoline maps of calculation rains, and quantitative ratios of volumes of storm and industrial waste water are calculated analytically. Prospects of the combined treatment technologies are outlined. **Results:** The approximating dependencies of intensity values of minor rains during a period of non-recurrent exceeding of calculation rain volume (at  $P = 0,05$  and  $0,1$  years), recommended by construction rules to determine storm water drainage, are calculated for the first time. Intensity parameters of calculation rains for railway stations of the Siberian and Far Eastern regions of the Russian Federation, significantly easing design process, were obtained. Assessment of reliability of approximation was carried out. Dependencies for determination of the ratio of volumes of storm water drainage directed for treatment were calculated for section railway stations depending on their freight density. It was established that on the Siberian and Far Eastern mainlines, calculation rates of storm water drainage at transport enterprises, all other things being equal, can differ by a ratio of six. **Practical importance:** Volumes of storm water drainage for the railroads of Siberia and the Far East were made more exact, taking into account location of the object to be designed. Analysis of the data obtained shows that for this part of the territory of the Russian Federation the intensity of calculation rains has the following values: between 4,5 and 26,2 mm at  $P = 0,1$  years, and between 3,3 and 22,9 mm at  $P = 0,05$  years, depending on the location of an object, whilst during design it is often set randomly in the range of between 5 and 10 mm which leads to considerable errors. The received results allow, with minimum time and monetary expenses, for reasonably accurate determination of the volumes of storm water drainage directed to treatment, and give an idea of a true ratio of industrial and rain water sewage, which significantly influences the choice of a method and the technological scheme of its treatment.

**Keywords:** Intensity of calculation rain, volume ratio of storm water and industrial drainage, extrapolation method.

## Введение

Очистка загрязненного поверхностного стока с территории коммунальных и транспортных предприятий является важнейшей экологической задачей [1–4]. Очистные сооружения проектируются на интенсивность расчетных дождей (т. е. дождей, на сток от которых производится расчет элементов системы канализации), обеспечивающих очистку не менее 70% годового объема дождевого стока [5, 6]. Это условие выполняется при обработке малоинтенсивных, часто повторяющихся дождей с периодом однократного превышения расчетной интенсивности дождя  $P = 0,05–0,1$  года [6, 7].

Данная работа является продолжением и дальнейшим развитием решения весьма

актуального вопроса по уточнению и упрощению расчетов объемов дождевой воды с территории железнодорожных предприятий Сибирского и Дальневосточного регионов России. Подобная работа была выполнена ранее для Европейской части РФ [8].

## Определение интенсивности расчетных дождей для Сибирской и Дальневосточной частей РФ

На основе математического моделирования дождей малой интенсивности для расчета дождевой канализации методом экстраполяции данных по большим и средним дождям при  $P \geq 0,2$  года [8] получены аппроксимирующие

зависимости для различных районов территории Сибирской и Дальневосточной частей РФ и аналогично методике, изложенной в [8], найдены значения интенсивности расчетного дождя по слою  $h_a$  (т. е. максимального суточного слоя осадков, мм, образующихся за дождь) для дождей с периодом однократного превышения  $P = 0,05$  и  $P = 0,1$  года.

Установлено, что для железнодорожных станций, расположенных в Сибирской и Дальневосточной частях РФ (рис. 1–3), диапазон изменения параметра  $h_a$  расчетных дождей весьма различен и зависит от географического положения. Эта величина составляет при  $P = 0,1$  года от  $h_a = 4,5$  мм до  $h_a = 26,2$  мм, при  $P = 0,05$  года от  $h_a = 3,3$  мм до  $h_a = 22,9$  мм, что исключает возможность применения при проектировании дождевой канализации железнодорожных станций некоторых усредненных значений интенсивности расчетных дождей.

По полученным данным в пределах рассматриваемой территории РФ действительная интенсивность расчетного дождя по слою  $h_a$ , а следовательно, и расчетные расходы дождевой воды, требующей очистки, на железнодорожных станциях Сибирского и Дальневосточного регионов РФ могут отличаться в 6 раз, что значительно превышает подобный показатель для Европейской части РФ [8].

В настоящее время при отсутствии реальных параметров интенсивности расчетных дождей при проектировании часто применяют абсолютно не соответствующие действительности произвольные значения  $h_a$  в рекомендуемом диапазоне от 5 до 10 мм [5–7] без учета реального местоположения объекта проектирования, что приводит к значительным погрешностям и вносит неопределенность в расчеты.

Завышение или занижение объемов местных очистных сооружений (МОС) в данном случае становится весьма вероятным и не всегда приемлемым. Поэтому от такого подхода при проектировании следует отказаться. С учетом имеющихся карт изолиний интенсивности расчетных дождей  $h_a$  для Европейской части РФ [8] и представленных результатов в на-

стоящей работе для территории Сибирского и Дальневосточного регионов РФ рассматриваемая задача становится просто и легко выполнимой и сокращает затраты труда и времени за счет исключения необходимости получения и обработки данных метеостанций.

Уточнение объемов дождевого стока может в значительной мере повлиять на выбор метода очистки, состава и технологической схемы очистных сооружений, их проектную производительность, а также на экономические показатели. Это создает предпосылки (возможности) более рационально и обоснованно использовать финансовые и трудовые ресурсы железнодорожных предприятий и обеспечивать более эффективную и надежную защиту окружающей среды.

### **Соотношение расходов дождевых и производственных сточных вод**

Очистка загрязненного дождевого стока на предприятиях железнодорожного транспорта, как правило, реализуется по двум вариантам: строительством отдельных локальных сооружений для очистки дождевого и талого стоков или посредством создания компактных совместных очистных сооружений, рассчитанных на очистку производственных сточных вод в сухую погоду и прием во время дождей поверхностных сточных вод в теплое время года и талых вод в весенний период.

К актуальным экологическим задачам на транспортных предприятиях относится очистка именно поверхностных сточных вод [4, 9–11], поскольку на многих предприятиях при наличии очистных сооружений производственных сточных вод дождевые стоки не очищаются или это осуществляется не в полном объеме. Также во многих случаях требуется повышение качества их очистки до нормативных показателей. Этот вопрос всегда возникает при эксплуатации действующих железнодорожных станций и их расширении.

Важнейшим фактором для принятия окончательного решения является соотношение

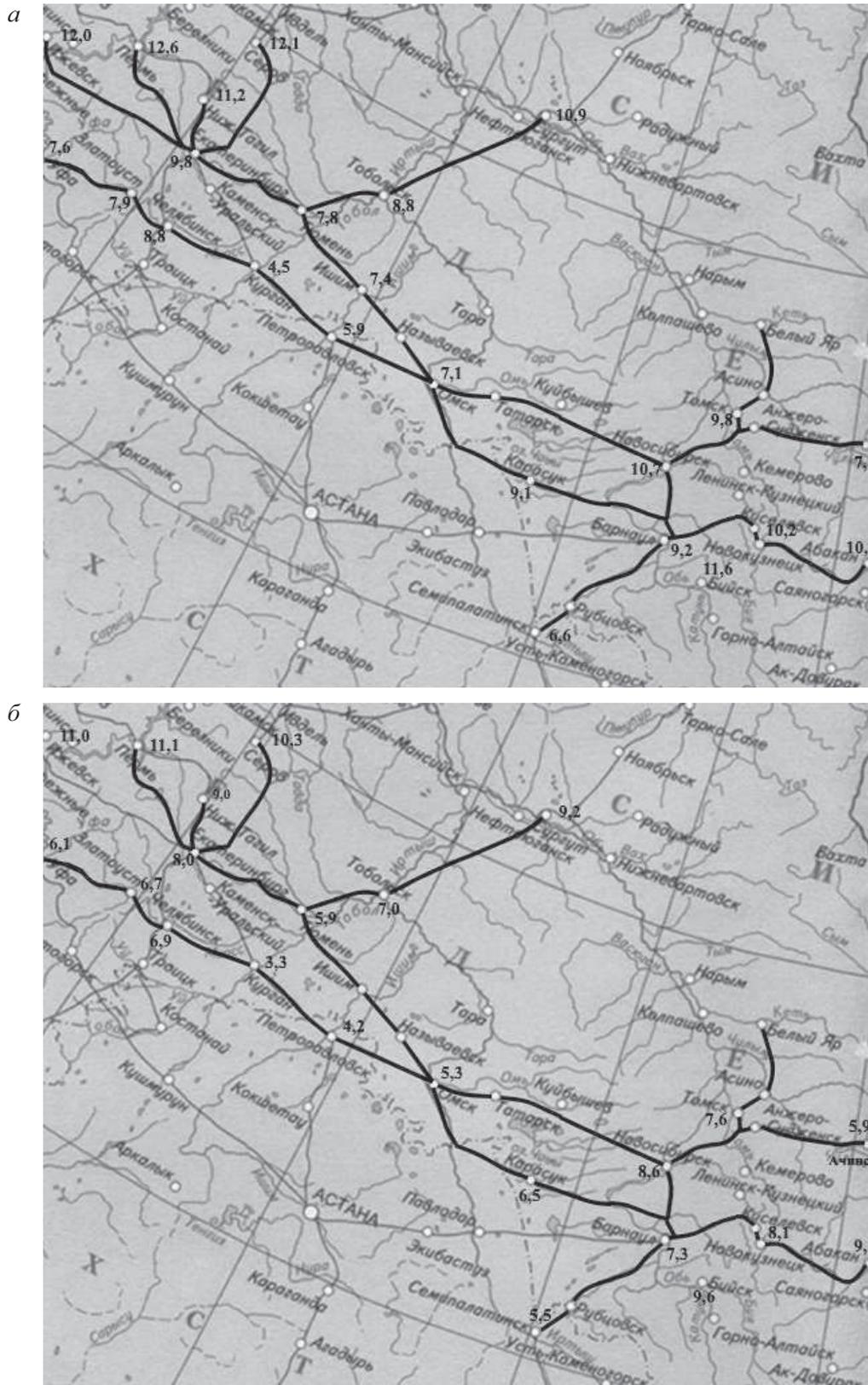
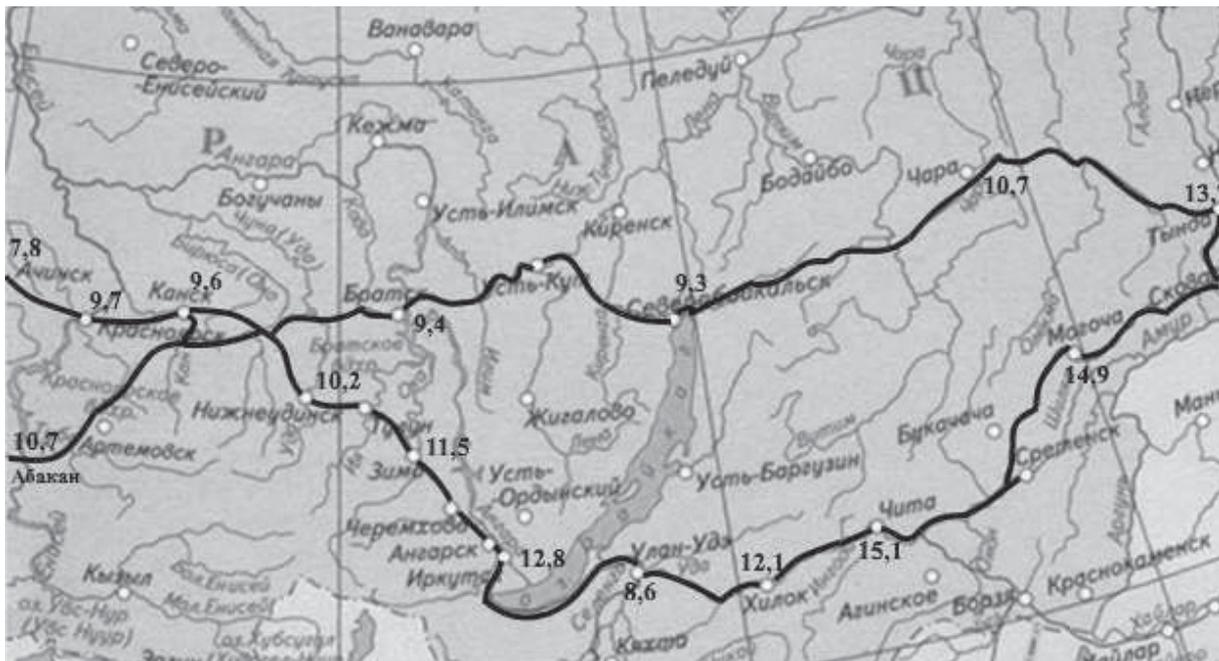


Рис. 1. Интенсивность расчетного дождя по слою  $h_a$ , мм, для проектирования дождевой канализации железнодорожных станций, расположенных в западной части Сибирского региона РФ, для  $P = 0,1$  (а) и  $P = 0,05$  года (б)

а



б

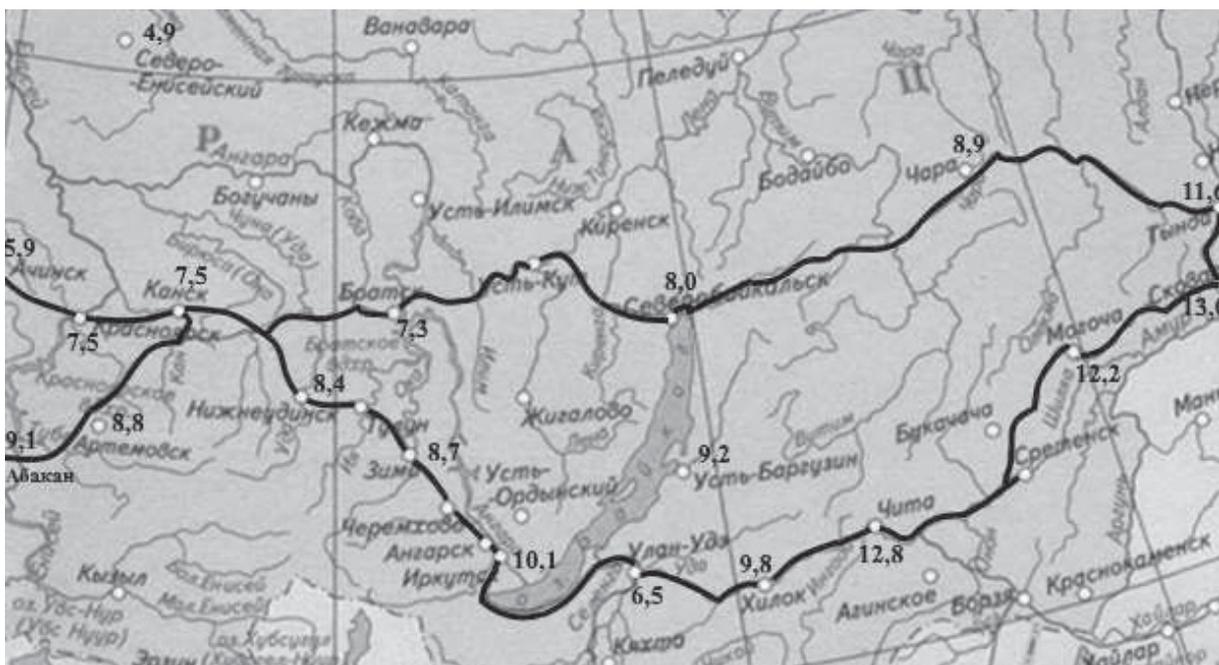


Рис. 2. Интенсивность расчетного дождя по слою  $h_a$ , мм, для проектирования дождевой канализации железнодорожных станций, расположенных в восточной части Сибирского региона РФ, для  $P = 0,1$  (а) и  $P = 0,05$  года (б)

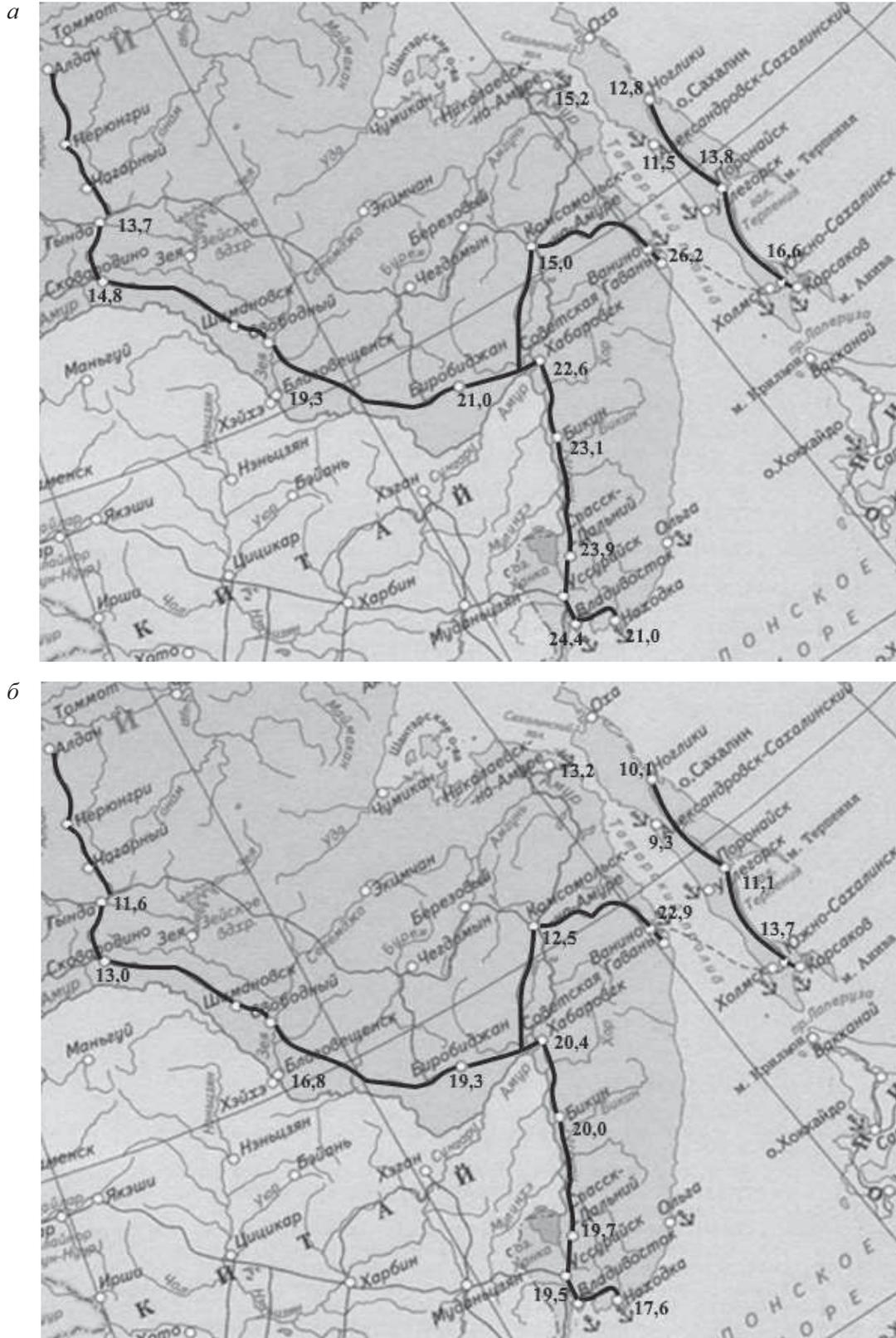


Рис. 3. Интенсивность расчетного дождя по слою  $h_a$ , мм, для проектирования дождевой канализации железнодорожных станций, расположенных в Дальневосточном регионе РФ, для  $P = 0,1$  (а) и  $P = 0,05$  года (б)

обрабатываемых объемов дождевых и производственных сточных вод. При проектировании их совместной очистки, оценке степени изменения состава, свойств и концентрации смеси по лимитирующим загрязнениям суточная производительность МОС  $Q_{\text{мос}}$ , м<sup>3</sup>/сут., определяется суммой объемов производственного и дождевого стоков:

$$Q_{\text{мос}} = Q_{\text{пр}} + Q_{\text{д}}. \quad (1)$$

В формуле (1) приняты следующие обозначения:  $Q_{\text{пр}}$  – суточный расход производственных сточных вод, м<sup>3</sup>/сут.;  $Q_{\text{д}}$  – суточный расход дождевых сточных вод, направляемых на очистку, м<sup>3</sup>/сут.; при наличии регулирующих резервуаров объемом  $W_{\text{рег}}$ :  $Q_{\text{д}} = W_{\text{рег}}$ .

Соотношение суточных расходов  $\eta_{\text{сут}}$ , поступающих на МОС, в случае выпадения дождя и в сухую погоду составит

$$\begin{aligned} \eta_{\text{сут}} &= \frac{Q_{\text{мос}}}{Q_{\text{пр}}} = 1 + \frac{Q_{\text{д}}}{Q_{\text{пр}}} = \\ &= 1 + \frac{W_{\text{рег}}}{Q_{\text{пр}}} = 1 + \frac{10 \cdot \psi_{\text{ср}} \cdot h_{\text{а}} \cdot F}{Q_{\text{пр}}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\psi_{\text{ср}}$  – средний коэффициент стока с площади водосбора, определяемый согласно [5, 6];  $h_{\text{а}}$  – максимальный суточный слой осадков, мм, образующихся за расчетный дождь;  $F$  – общая площадь водосбора, га.

Переработка на МОС дождевого стока из регулирующих резервуаров объемом  $W_{\text{рег}}$ , м<sup>3</sup>, обычно принимается  $T_{\text{сут}} = 1$  сут., а в последнее время величину  $T_{\text{сут}}$  рекомендуется увеличивать до 3 сут. [5, 6, 9].

Особый интерес в связи с развитием Сибирского и Дальневосточного частей РФ и экономического сотрудничества с КНР, а также реализации развития отрасли на перспективу [12, 13] представляют получение и оценка для Сибирской и Дальневосточной частей РФ данных по расчетным дождям и прогнозирование соотношения подлежащих очистке объемов дождевых и производственных сточных вод. В связи с этим были рассмотрены четыре

типа наиболее распространенных участковых железнодорожных станций с грузооборотом 170, 170–300, 300–460 и 460–690 т/сут. [14]. Для них проанализированы размеры площадей водосборов, интенсивности расчетных дождей по слою  $h_{\text{а}}$ , расходы дождевых вод, определены в соответствии с отраслевыми нормами [15] производственные расходы сточных вод  $Q_{\text{пр}}$  и найдены соотношения суточных расходов  $Q_{\text{д}}$  и  $Q_{\text{пр}}$  в зависимости от грузооборота станций.

В результате обработки полученных данных с учетом времени переработки дождевого стока  $T_{\text{сут}}$ , сут., оказалось возможным для железнодорожных станций указанных типов определить зависимость суточного расхода дождевых сточных вод  $Q_{\text{д}}$  через расход производственных стоков  $Q_{\text{пр}}$  этих станций независимо от грузооборота. Эта зависимость имеет вид, м<sup>3</sup>/сут.:

$$Q_{\text{д}} = W_{\text{рег}} = 0,664 \cdot \psi_{\text{ср}} \cdot h_{\text{а}} \cdot Q_{\text{пр}}. \quad (3)$$

Используя зависимость (3), можно представить формулу (2) для станций указанных типов независимо от грузооборота так:

$$\eta'_{\text{сут}} = \frac{Q_{\text{мос}}}{Q_{\text{пр}}} = 1 + \frac{0,664 \cdot \psi_{\text{ср}} \cdot h_{\text{а}}}{T_{\text{сут}}}. \quad (4)$$

Зависимости (2)–(4) позволяют проанализировать влияние расходов дождевого стока на производительность очистных сооружений при их совместной очистке с производственным стоком.

Для снижения производительности совместных очистных сооружений, если это возможно по местным условиям, рекомендуется увеличивать время переработки  $T_{\text{сут}}$  до 3 сут. Тогда необходимая суточная производительность совместных МОС соответственно снижается.

Увеличение времени переработки зарегулированного дождевого стока не влияет на объем регулирующих резервуаров  $W_{\text{рег}}$  и их стоимость, но позволяет значительно уменьшить стоимость совместных МОС за счет бо-

лее длительного периода обработки дождевого стока, что понижает его расход до 3 раз, а соответственно и требуемую производительность совместных МОС.

Для железнодорожных станций Сибирского и Дальневосточного регионов РФ величина  $h_a$ , а следовательно, и необходимый объем регулирующих резервуаров  $W_{\text{пер}}$  изменяются в широком диапазоне. Так, при  $P = 0,05$  года значение  $h_a$  колеблется от 3,3 до 4,5 мм, а при  $P = 0,1$  года находится в диапазоне 22,9–26,2 мм. Тогда, принимая время обработки зарегулированного дождевого стока в течение суток ( $T_{\text{сут}} = 24$  ч),  $\psi_{\text{ср}} = 0,3$  получаем соответственно (для разных  $h_a$ )  $\eta'_{\text{сут}} = 1,66–1,90$  и  $5,56–6,22$ . При времени регулирования  $T_{\text{сут}} = 48$  ч соответственно  $\eta'_{\text{сут}} = 1,33–1,45$  и  $3,28–3,61$ , а при  $T_{\text{сут}} = 72$  ч –  $\eta'_{\text{сут}} = 1,22–1,30$  и  $2,52–2,74$ .

Полученные результаты показывают, что время обработки зарегулированного дождевого стока и его обоснованное значение существенно снижает требуемую мощность очистных сооружений и не влияет на объем и стоимость регулирующих резервуаров.

## Заключение

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1) получены значения интенсивности расчетных дождей для железных дорог Сибирской и Дальневосточной частей Российской Федерации, позволяющие определять величину слоя атмосферных осадков для конкретной местности без обработки данных метеостанций, что упрощает и уточняет расчеты при проектировании очистных сооружений;

2) установлен диапазон изменения соотношения суточных расходов дождевых и производственных сточных вод для учета при совместной их очистке на МОС и получены соответствующие расчетные зависимости (2)–(4) для типовых участковых железнодорожных станций Сибирского и Дальневосточного регионов РФ с грузооборотом от 170 до 690 т/сут.;

3) для повышения надежности определения объемов дождевого стока при проектировании необходимо учитывать действительную интенсивность расчетных дождей для разрабатываемых объектов в зависимости от их географического положения и предусматривать возможно максимальное время его переработки на очистных сооружениях.

## Библиографический список

1. Водный кодекс Российской Федерации : от 03.06.2006 г. № 74-ФЗ : (ред. от 03.08.2018) : (с изм. и доп., вступившими в силу с 01.01.2019) // КонсультантПлюс. ВерсияПроф [Электронный ресурс] (дата обращения : 02.01.2019).
2. Федеральный закон «Об охране окружающей среды» : от 10.01.2002 г. № 7-ФЗ : (ред. от 27.12.2018) : (с изм. и доп., вступившими в силу с 01.01.2019) // КонсультантПлюс. ВерсияПроф [Электронный ресурс] (дата обращения : 02.01.2019).
3. Дикаревский В.С. Отведение и очистка поверхностных сточных вод : учеб. пособие / В.С. Дикаревский, А.М. Курганов, А.П. Нечаев, М.И. Алексеев. – Л. : Стройиздат, Ленингр. отд., 1990. – 224 с.
4. Дикаревский В.С. Водоохранные сооружения на железнодорожном транспорте / В.С. Дикаревский, И.И. Караваев. – М. : Транспорт, 1986. – 211 с.
5. Рекомендации по расчету систем сбора, отведения и очистки поверхностного стока с селитебных территорий, площадок предприятий и определению условий выпуска его в водные объекты. – М. : ОАО «НИИ ВОДГЕО», 2014. – 88 с.
6. СП 32.13330.2012. Канализация. Наружные сети и сооружения. – Актуализир. ред. СНиП 2.04.03–85. – М. : Минрегион России, 2012. – 85 с.
7. Иванов В.Г. Временные указания по применению, подбору и оценке эффективности локальных очистных сооружений «FLOTENK» для очистки поверхностных сточных вод / В.Г. Иванов, Н.А. Черников, А.В. Петров, А.Е. Колотыгин, Д.В. Кобозев. – СПб. : ЗАО «Флотенк», 2012. – 102 с.
8. Иванов В.Г. Математическое моделирование дождей малой интенсивности для расчета ливневой канализации / В.Г. Иванов, А.А. Калачко // Изв.

Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2015. – Вып. 3 (44). – С. 138–146.

9. Иванов В. Г. Водоснабжение и водоотводящие системы промышленных предприятий : учебник / В. Г. Иванов, Н. А. Черников. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2018. – 740 с.

10. Соловьева Е. А. Методика определения расчетных показателей расхода и состава сточных вод / Е. А. Соловьева, Б. Г. Мишуков // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2015. – Вып. 3 (44). – С. 194–200.

11. Канцибер Ю. А. Расчеты характеристик поверхностного стока систем водоотведения на сельских и производственных территориях Северо-Запада РФ / Ю. А. Канцибер, А. Б. Пономарев // Водоочистка. – 2016. – № 12. – С. 20–25.

12. Иванов В. Г. Экологический комментарий к федеральной целевой программе «Развитие транспортной системы России (2010–2015 годы)» / В. Г. Иванов, Н. А. Черников // Транспорт Российской Федерации. – 2008. – № 6 (19). – С. 63–65.

13. Иванов В. Г. Совершенствование нормирования и возможности современных технологий очистки сточных вод железнодорожных предприятий / В. Г. Иванов, Н. А. Черников // Техносферная и экологическая безопасность на транспорте. ТЭБ ТРАНС–2010 : материалы 2-й Междунар. науч.-практич. конференции. – СПб. : ПГУПС, 2010. – С. 157–163.

14. Апатцев В. И. Железнодорожные станции и узлы : учебник / В. И. Апатцев, Ю. И. Ефименко, Н. В. Правдин и др. ; под ред. В. И. Апатцева, Ю. И. Ефименко. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2014. – 855 с.

15. Нормы водопотребления и водоотведения в технологических процессах отрасли ОН 016-01124328–2000. – М. : Транспорт, 2000. – 10 с.

## References

1. *Vodnyi kodeks Rossiiskoi Federatsii [Water code of the Russian Federation]*, dated Jun. 3, 2006 N 74-FZ (revised Aug. 3, 2018, with changes and additions in effect from Jan. 1, 2019). Accessed via the legal reference system Konsul'tantPlius (accessed: 02.01.2019). (In Russian)

2. *Federal law "Ob okhrane okruzhaiushchei sredy" [On environmental protection]*, dated Jan. 10, 2002 N 7-FZ (revised on Dec. 27, 2018, with changes and additions in effect from Jan. 1, 2019). Accessed via the legal reference system Konsul'tantPlius (accessed: 02.01.2019). (In Russian)

3. Dikarevskii V. S., Kurganov A. M., Nechaev A. P. & Alekseev M. I. *Otvedenie i ochestka poverkhnostnykh stochnykh vod [Disposal and treatment of surface sewage waters]*. Training manual. Leningrad, Leningrad branch of Stroiizdat Publ., 1990, 224 p. (In Russian)

4. Dikarevskii V. S. & Karavaev I. I. *Vodookhrannye sooruzheniia na zheleznodorozhnom transporte [Water protection structures on railway transport]*. Moscow, Transport Publ., 1986, 211 p. (In Russian)

5. *Rekomendatsii po raschetu sistem sbora, otvedeniia i ochestki poverkhnostnogo stoka s selitebnykh territorii, ploshchadok predpriatii i opredeleniiu uslovii vypuska ego v vodnye ob'ekty [Recommendations on calculating systems for collection, disposal and treatment of surface water drainage from residential areas and industrial estates, and for stipulation of conditions of its release into water bodies]*. Moscow, Integrated Scientific Research, Design and Technology Institute for Water Services, Sewerage, Hydraulic Architecture and Engineering Hydrogeology (winner of the Red Banner of Labour award) Publ., 2014, 88 p. (In Russian)

6. *Construction rules SP 32.13330.2012. Kanalizatsiia. Naruzhnye seti i sooruzheniia [Sewerage. Public utilities]*. Revised edition of SNiP 2.04.03–85. Moscow, Russian Regional Development Ministry Publ., 2012, 85 p. (In Russian)

7. Ivanov V. G., Chernikov N. A., Petrov A. V., Kolytygin A. E. & Kobozev D. V. *Vremennye ukazaniia po primeneniui, podboru i otsenke effektivnosti lokal'nykh ochistnykh sooruzhenii FLOTENK dlia ochistki poverkhnostnykh stochnykh vod [Provisional directions on application, selection and efficiency evaluation of local waste treatment plants FLOTENK for purification of surface sewage waters]*. Saint Petersburg, Flotenk Publ., 2012, 102 p. (In Russian)

8. Ivanov V. G. & Kalachko A. A. *Matematicheskoe modelirovanie dozhdei nizkoi intensivnosti dlia rascheta livnevoi kanalizatsii [Mathematical simulation of low-intensity rains for calculation of storm water sewage systems]*. *Izvestiya Peterb. universiteta putei*

*soobshcheniia* [Proc. of Petersburg Transport University]. Saint Petersburg, Petersburg State Transport University Publ., 2015, issue 3 (44), pp. 138–146. (In Russian)

9. Ivanov V.G. & Chernikov N.A. *Vodosnabzhenie i vodootvodiashchie sistemy promyshlennykh predpriatii* [Water supply and water collection systems of industrial enterprises]. Course book. Moscow, Training Centre for Railway Transport Education Publ., 2018, 740 p. (In Russian)

10. Solov'eva E.A. & Mishukov B.G. *Metodika opredeleniia raschetnykh pokazatelei raskhoda i sostava stochnykh vod* [Methods for determination of calculation values of sewage flow rate and composition]. *Izvestiya Peterb. universiteta putei soobshcheniia* [Proc. of Petersburg Transport University]. Saint Petersburg, Petersburg State Transport University Publ., 2015, issue 3 (44), pp. 194–200. (In Russian)

11. Kantsiber Iu.A. & Ponomarev A.B. *Raschety kharakteristik poverkhnostnogo stoka sistem vodootvedeniia na selitebnykh i proizvodstvennykh territoriiakh Severo-Zapada RF* [Calculation of characteristics of surface sewage waters for water collection systems in residential and production territories of the North-Western regions of the Russian Federation]. *Vodoochistka* [Water purification], 2016, no. 12, pp. 20–25. (In Russian)

12. Ivanov V.G. & Chernikov N.A. *Ekologicheskii kommentarii k federal'noi tselevoi programme "Raz-*

*vitie transportnoi sistemy Rossii (2010–2015 gody)"* [Environmental commentary on the federal special-purpose programme for development of Russia's transport system 2010–2015]. *Transport Rossiiskoi Federatsii* [Transport of the Russian Federation], 2008, no. 6 (19), pp. 63–65. (In Russian)

13. Ivanov V.G. & Chernikov N.A. *Sovershenstvovanie normirovaniia i vozmozhnosti sovremennykh tekhnologii ochildki stochnykh vod zheleznodorozhnykh predpriatii* [Perfecting regulation and capabilities of modern technologies for railway transport enterprises' waste water treatment]. *Tekhnosfernaia i ekologicheskaiia bezopasnost' na transporte. TEB TRANS–2010* [Technosphere and environmental safety on transport. TEB TRANS–2010]. Proc. of the 2<sup>nd</sup> Intern. Sci. and Practical conf. Saint Petersburg, Petersburg State Transport University Publ., 2010, pp. 157–163. (In Russian)

14. Apatsev V.I., Efimenko Yu.I., Pravdin N.I. et al. *Zheleznodorozhnye stantsii i uzly* [Railway stations and junctions]. Course book. Ed. by V.I. Apatsev & Yu.I. Efimenko. Moscow, Training Centre for Railway Transport Education Publ., 2014, 855 p. (In Russian)

15. *Normy vodopotrebleniia i vodootvedeniia v tekhnologicheskikh protsessakh otrasli* [Norms of water consumption and waste water disposal in technological processes of the industry] ON 016-01124328–2000. Moscow, Transport Publ., 2000, 10 p. (In Russian)

ИВАНОВ Виктор Григорьевич – д-р техн. наук, профессор, 4578304@mail.ru; ЧЕРНИКОВ Николай Андреевич – д-р техн. наук, профессор, nika\_pgups@mail.ru; \*ТВАРДОВСКАЯ Надежда Владимировна – канд. техн. наук, доцент, tvardov\_nv@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 629.01.02/03

**С. Л. Самошкин, А. Н. Макаров, А. А. Хоменко, П. Ю. Семенов****ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ  
КРОНШТЕЙНОВ КРЕПЛЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА К РАМЕ ВАГОНА**

Дата поступления: 24.12.2018

Решение о публикации: 21.01.2019

**Аннотация**

**Цель:** Сравнительные прочностные испытания различных конструктивных решений кронштейнов крепления генератора к раме вагона в системах автономного энергоснабжения пассажирских вагонов, оснащенных редукторно-карданными приводами. Рассмотрение вариантов исполнения кронштейнов крепления генераторов, взятых из эксплуатации, с тремя вариантами их усиления.

**Методы:** Статические и усталостные испытания проводились по методикам, разработанным с учетом требований стандартов и нормативных документов, используемых при сертификационных испытаниях железнодорожной техники. Эти методики были согласованы с изготовителями генераторов и службами, осуществляющими эксплуатацию редукторно-карданных приводов от середины оси колесной пары. **Результаты:** Проведены оценка статической прочности при воздействии нормативных нагрузок и сравнение усталостной прочности разных вариантов исполнения кронштейнов генератора путем сопоставления их наработок до появления трещин при одинаковых условиях нагружения. При этом были отработаны конструктивные исполнения кронштейнов для новых генераторов и варианты для генераторов, находящихся в эксплуатации. **Практическая значимость:** Полученные результаты позволили выявить зоны появления трещин и разработать методы повышения предела выносливости кронштейнов до нормативного уровня. Для новых генераторов было предложено отнести отверстия под болт крепления торцевой крышки от шва приварки дополнительной накладке на 20–30 мм.

**Ключевые слова:** Генератор, кронштейн, статическая прочность, наработка, предел выносливости, наплавка, дополнительная накладка.

**Sergei L. Samoshkin**, Dr. Eng. Sci., chief office; \***Aleksandr N. Makarov**, engineer, lexx\_mak@mail.ru; **Andrei A. Khomenko**, Cand. Eng. Sci., head laboratory (Tver Carriage-Building Institute PLC); **Pavel Yu. Semenov**, general director (Trans-PrivodTver LLC) EXPERIMENTAL STUDY OF STRENGTH OF BRACKET FOR MOUNTING GENERATORS ON CARRIAGE FRAME. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-1-105-117

**Summary**

**Objective:** Comparative strength tests of various design solutions of brackets for mounting generators on carriage frame in stand-alone power supply systems of passenger carriages equipped with geared cardan drive. Consideration of design modifications of brackets for mounting generators removed from operation, with three options of strengthening them. **Methods:** Static and fatigue tests were carried out in accordance with methods developed subject to standards and regulatory documents used in railway engineering certification tests. These methods were approved by generator producers and by services operating geared cardan drives from the centre of wheel set axle. **Results:** Evaluation of static strength under the influence of prescribed loads and comparison of fatigue strength of various design modification of generator brackets by comparing their service hours before appearance of cracks under similar loading conditions were carried out. In the process, bracket design modifications were worked out for new generators and

for generators currently in operation. **Practical importance:** The results obtained permitted identification of crack appearance zones and development of methods for increasing the bracket fatigue strength to prescribed levels. For new generators, it was proposed to move hold-down bolt-mounting holes of head plate 20–30 mm away from additional weld cover plate.

**Keywords:** Generator, bracket, static strength, service hours, fatigue strength, weld seam, additional cover plate.

## Введение

С середины 90-х годов XX в. на ОАО «Тверской вагоностроительный завод» было начато серийное производство пассажирских вагонов с кондиционированием воздуха и автономной системой энергоснабжения. Для обеспечения работы этой системы используется генератор, подвешенный к раме вагона с редукторно-карданным приводом от середины оси колесной пары. Привод генератора обеспечивает работу автономной системы энергоснабжения при движении вагона в диапазоне скоростей от 40 до 160 км/ч. С учетом передаточного отношения редуктора, равного 3,727, скоростной диапазон работы генератора составляет от 850 до 3600 об/мин [1, 2].

Долгое время на отечественных пассажирских вагонах с кондиционированием воздуха устанавливался привод WBA-32/2 производства фирмы «Flender» (ФРГ). На рис. 1 представлен общий вид данного привода.

При движении вагона крутящий момент от конического одноступенчатого редуктора, установленного на средней части оси колесной пары, передается через карданный вал 4 и эластичную муфту 6 ротору генератора 10. Рычаг с реактивной опорой 2, закрепленной на корпусе генератора, связан с поперечной балкой 1 рамы тележки через упругий амортизатор, препятствует повороту редуктора относительно колесной пары. Для исключения падения на путь карданного вала 5, муфты 7 и генератора 8 при их разрушении в конструкции вагона

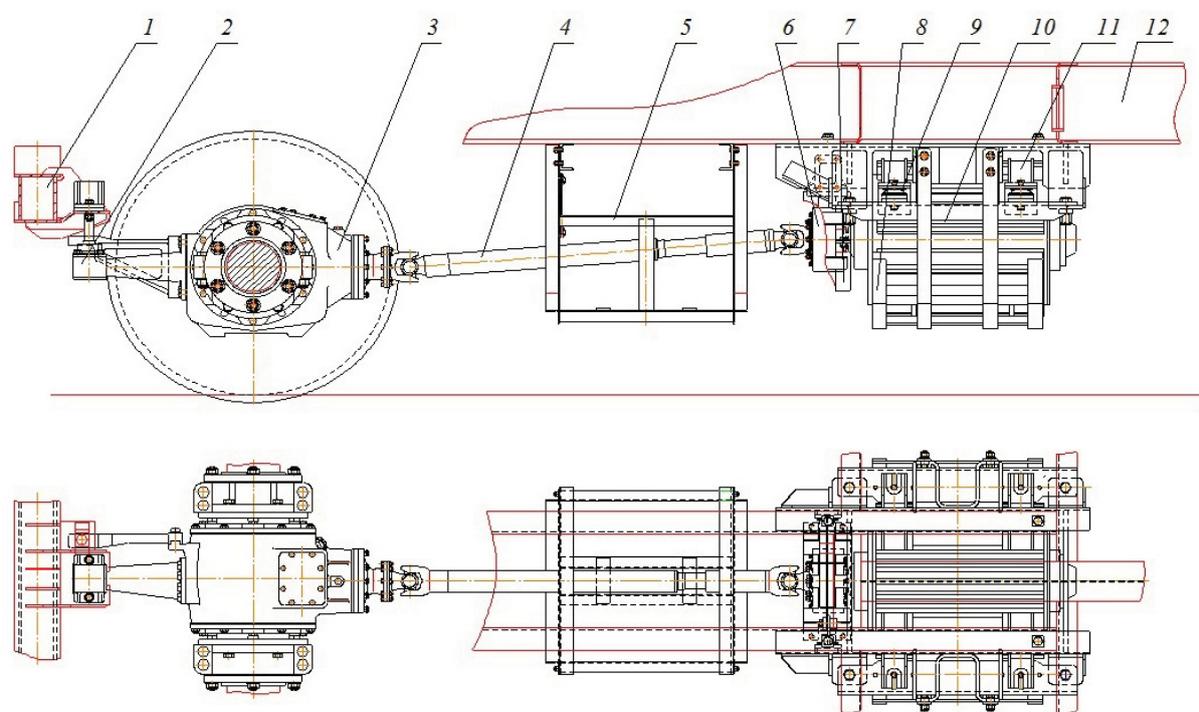


Рис. 1. Схема размещения генераторной установки пассажирского вагона с приводом от середины оси типа WBA-32/2 (объяснение в тексте)

имеются предохранительные устройства. Генератор с помощью специальных кронштейнов (лап) 11 через амортизаторы 9 крепится к раме вагона 12. Общая масса узлов привода и генератора составляет около 1750 кг.

В начале 2000-х годов с целью снижения себестоимости продукции и по программе импортозамещения ряд российских предприятий освоили производство всех узлов привода WBA-32/2, которые взаимозаменяемы по присоединительным размерам и не изменяют принципиальную кинематическую схему привода [3–6]. Однако в процессе эксплуатации пассажирских вагонов были выявлены отдельные случаи появления трещин на кронштейнах генератора. Для устранения этого явления, повышения безопасности движения и надежности электроснабжения вагонов были разработаны варианты усиления и ремонта кронштейнов генераторов.

#### Объект испытаний и методика проведения испытаний

В настоящее время в качестве источника тока получили распространение два отечественных генератора: ГИВ-25.У1 производства

ООО «ПензЭлмаш» [7] и ТВГ-35.У1 производства ООО «ТрансПриводТверь». Корпус и кронштейны генератора ГИВ-25.У1 изготовлены из стали Ст3 Сп2 ГОСТ 14637–89 ( $\sigma_T = 250$  МПа), а ТВГ-35.У1 – из стали Ст3сп5-св ГОСТ 14637–89 ( $\sigma_T = 240$  МПа). В генераторе ТВГ-35.У1 установлена дополнительная накладка толщиной 12 мм с продлением ее до наружной поверхности корпуса генератора.

Сначала испытаниям подвергались два образца генератора ГИВ-25.У1, бывших в эксплуатации, с тремя вариантами исполнения лап (рис. 2, 3).

На первом образце:

1 – кронштейн с трещиной, отремонтированный сваркой и усиленный методом наплавки (рис. 2, б);

2 и 3 – кронштейны, усиленные методом наплавки (рис. 2, б);

4 – кронштейн в исполнении завода-изготовителя (рис. 2, а).

На втором образце:

1 – кронштейн в исполнении завода-изготовителя (рис. 2, а);

2 и 4 – кронштейны без трещин, усиленные путем усановки дополнительной накладки (рис. 2, в);

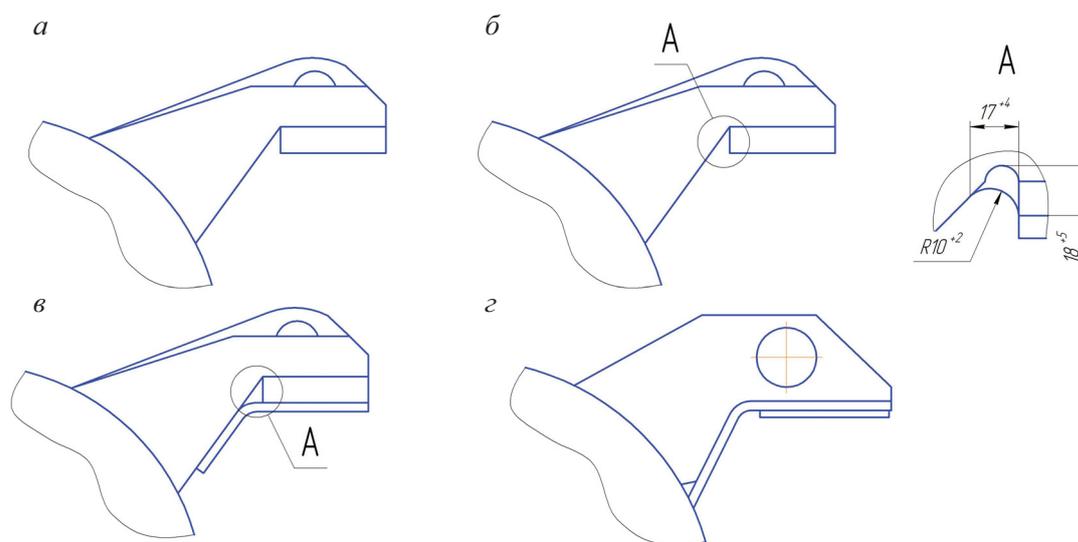


Рис. 2. Варианты исполнения кронштейнов генераторов ГИВ 25.У1 и ТВГ-35.У1:  
а – исполнение завода-изготовителя (ГИВ 25.У1); б – усиление наплавкой (ГИВ 25.У1);  
в – усиление наплавкой и дополнительной накладкой (ГИВ 25.У1); г – исполнение  
завода-изготовителя (ТВГ-35.У1)

3 – кронштейн с трещиной, отремонтированный сваркой с установленной дополнительной накладкой (рис. 2, в).

Суть ремонтного варианта кронштейна генератора заключалась в разделке кромок и заварке трещины с последующим усилением ее методом наплавки (рис. 2, б) – в первом ремонтном варианте и с последующей установкой на ребра дополнительной накладки толщиной 8 мм, не достигающей до корпуса, примерно 40 мм – во втором ремонтном варианте (рис. 2, в).

Затем испытывали генератор ТВГ-35.У1 с одним вариантом исполнения кронштейнов (рис. 2, з).

Испытания кронштейнов генератора проводились по методике, разработанной в соответствии с [8–11], в два этапа. На первом этапе испытаний определялись напряжения в кронштейнах от действия расчетных статических

нагрузок, которые сравнивались с допускаемыми значениями, на втором – оценивалась работа кронштейнов до образования трещины при действии циклических нагрузок.

Генератор закреплялся одновременно на четырех опорах-амортизаторах в случае одинаковой жесткости кронштейнов и одновременно на двух опорах при разной жесткости, что позволило обеспечить равномерное нагружение кронштейнов генератора. Схема нагружения кронштейнов генератора приведена на рис. 3. Величины максимальных нагрузок, действующих на генератор, с учетом данных [7] составляли:  $P_B = 7,053$  кН,  $P_{Г.пр} = 51,5$  кН. Тензорезисторы размещались на всех четырех кронштейнах генератора. Схему установки тензорезисторов иллюстрирует рис. 4.

Суммарные напряжения, определенные от действия расчетных нагрузок по режимам

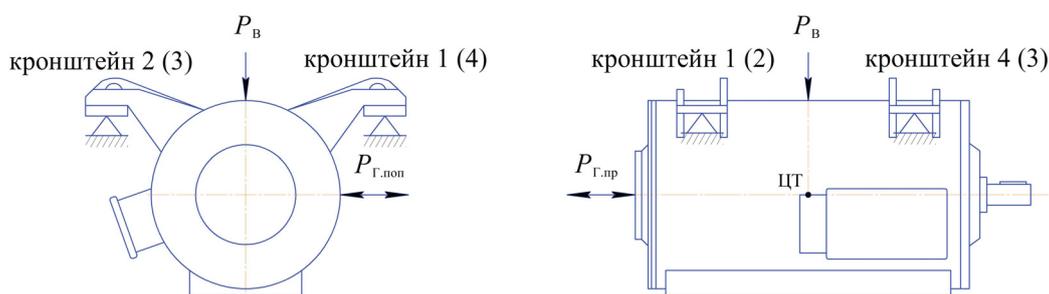


Рис. 3. Схема опирания и нагружения кронштейнов генератора при статических испытаниях расчетными нагрузками

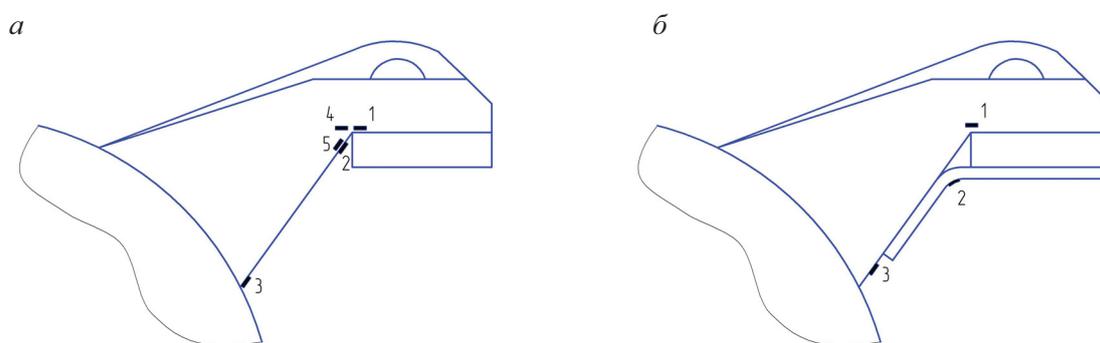


Рис. 4. Схема установки тензометрических датчиков на кронштейнах генератора ГИВ-25.У.1:

- а* – на кронштейнах в исполнении завода-изготовителя и усиленных наплавкой;  
*б* – на кронштейнах, усиленных наплавкой и дополнительной накладкой

нагружения, сравнивались с допускаемыми значениями, которые равны:

- для I режима (продольное ускорение  $a_x = 10g$ )  $[\sigma]_I = 225$  МПа;
- для III режима  $[\sigma]_{III} = 165$  МПа.

После статических испытаний на втором этапе кронштейны генератора подвергались усталостным испытаниям от действия вертикальной нагрузки, приложенной к корпусу генератора. Они проводились методом ступенчатого нагружения на нескольких уровнях динамического нагружения, с постоянным коэффициентом асимметрии, который был принят равным 0,25. Частота нагружения при испытаниях кронштейнов генератора составляла 4,0 Гц.

На рис. 5 представлена установка генератора в рабочем пространстве испытательной машины при усталостных испытаниях вертикальной нагрузкой в соответствии с рекомендациями [12–14].

### Испытания кронштейнов генератора ГИВ-25.У1, усиленных наплавкой

Максимальные суммарные напряжения, определенные от действия расчетных нагру-

зок по режимам нагружения на первом образце генератора, были равны:

- для I режима (продольное ускорение  $a_x = 10g$ )  $\sigma_I = 153$  МПа, что меньше допускаемого значения  $[\sigma]_I = 225$  МПа;
- для III режима  $\sigma_{III} = 28$  МПа, что меньше допускаемого значения  $[\sigma]_{III} = 165$  МПа.

При усталостных испытаниях генератора ГИВ-25.У1 от действия вертикальной нагрузки на первой ступени режим нагружения кронштейнов генератора следующий:  $P_{\min} = 24,5$  кН,  $P_{\max} = 98,1$  кН. При наработке  $1,235 \cdot 10^6$  циклов нагружения возникла первая трещина по радиусной зоне наружного ребра кронштейна 1 (ремонтный вариант). После наработки  $2,607 \cdot 10^6$  циклов нагружения был осуществлен переход на вторую ступень нагружения, на которой режим нагружения кронштейнов генератора составлял:  $P_{\min} = 27,0$  кН,  $P_{\max} = 107,9$  кН. При наработке  $0,833 \cdot 10^6$  циклов нагружения появилась вторая трещина по радиусной зоне наружного ребра кронштейна 4, при наработке  $0,933 \cdot 10^6$  циклов нагружения – третья трещина по радиусной зоне внутреннего ребра кронштейна 1, при наработке  $1,074 \cdot 10^6$  циклов – четвертая трещина по радиусной зоне внутреннего ребра кронштейна 4, при наработке  $1,133 \cdot 10^6$  циклов –



Рис. 5. Установка генератора в испытательной машине при усталостных испытаниях

пятая и шестая трещины по радиусной зоне наружного и внутреннего ребер кронштейна 2 (усиленный вариант кронштейна). При наработке  $1,458 \cdot 10^6$  циклов нагружения на второй ступени нагружения произошло разрушение кронштейна 4 по второй трещине.

Сравнение усталостной прочности различных вариантов исполнения кронштейнов генератора проведем путем сопоставления их наработок до появления трещин при одинаковых условиях нагружения.

Используя уравнение кривой усталости

$$P^m \cdot N = \text{const}, \quad (1)$$

в которой  $P$  – величина нагрузки,  $m$  – показатель степени уравнения кривой усталости,  $N$  – количество циклов нагружения или наработка до появления трещины, пересчитаем наработку, полученную для первой трещины и до останова испытаний на первой ступени нагружения, где  $P_{\text{max}} = 98,1$  кН, на режим нагружения второй ступени нагружения с  $P_{\text{max}} = 107,9$  кН.

В уравнении (1) принимаем, что  $m = 4$  [15].

После вычислений имеем следующие значения наработок:  $0,843 \cdot 10^6$  циклов нагружения – наработка до появления первой трещины (кронштейн 1) при пересчете на режим второй ступени нагружения и  $1,781 \cdot 10^6$  циклов нагружения – наработка до останова при пересчете на режим второй ступени нагружения.

Тогда наработка для второй и последующих трещин с учетом пересчета составит:

- $2,613 \cdot 10^6$  циклов нагружения – по второй трещине (кронштейн 4);
- $2,713 \cdot 10^6$  циклов нагружения – по третьей трещине (кронштейн 1);
- $2,854 \cdot 10^6$  циклов нагружения – по четвертой трещине (кронштейн 4);
- $2,913 \cdot 10^6$  циклов нагружения – по пятой и шестой трещинам (кронштейн 2);
- $3,238 \cdot 10^6$  циклов нагружения – до разрушения по второй трещине (кронштейн 4).

Анализируя результаты усталостных испытаний кронштейнов генератора, отмечаем, что минимальная наработка до появления первой трещины –  $0,843 \cdot 10^6$  циклов нагружения

на кронштейне 1 ремонтного варианта, что в 3,1 раза меньше наработки до образования второй трещины на кронштейне 4, оставленной в первоначальном исполнении, и в 3,45 раза меньше наработки до возникновения пятой трещины на усиленном кронштейне 2. В то же время усиление кронштейна 2 привело к незначительному увеличению в 1,1 раза наработки по сравнению с наработкой кронштейна 4, оставленного в первоначальном исполнении.

Очевидно, что предложенный вариант ремонта кронштейнов генератора не обеспечивает необходимую усталостную прочность и следует разработать новую технологию, например с перекрытием угла кронштейнов листом.

### Испытания кронштейнов генератора ГИВ-25.У1, усиленных дополнительной накладкой

Анализ величин напряжений, возникающих в кронштейнах генератора ГИВ-25.У1, показывает, что суммарные напряжения от действия статических нагрузок не превышают допускаемых значений как для I ( $\sigma_I = 72$  МПа  $<$   $[\sigma]_I = 225$  МПа), так и для III режимов нагружения ( $\sigma_{III} = 18$  МПа  $<$   $[\sigma]_{III} = 165$  МПа).

При усталостных испытаниях в связи с тем, что у кронштейнов генератора, выполненных с дополнительной накладкой и без нее, различная жесткость, для обеспечения равномерного нагружения кронштейнов, принято решение испытывать кронштейны по парам: сначала кронштейны 3 и 4, затем 1 и 2.

Пары кронштейнов 3–4 и 1–2 испытывались на трех ступенях нагружения. На первой ступени режим нагружения первой пары кронштейнов составлял  $P_{\text{min}} = 12,3$  кН,  $P_{\text{max}} = 49,1$  кН. При наработке  $0,95 \cdot 10^6$  циклов нагружения появилась первая трещина по окончании шва приварки наружного ребра с наружной стороны кронштейна 4 (установлена дополнительная накладка) к корпусу генератора, а при наработке  $2,456 \cdot 10^6$  циклов нагружения – вторая трещина по окончании шва приварки внутреннего ребра с наружной стороны

этого же кронштейна 4 к корпусу генератора. После наработки  $3,224 \cdot 10^6$  циклов нагружения был осуществлен переход на вторую ступень с режимом нагружения:  $P_{\min} = 14,7$  кН,  $P_{\max} = 58,9$  кН. После наработки  $1,293 \cdot 10^6$  циклов (без образования новых трещин) – переход на третью ступень нагружения с режимом нагружения  $P_{\min} = 19,62$  кН,  $P_{\max} = 78,5$  кН. При наработке  $0,272 \cdot 10^6$  циклов нагружения возникла третья трещина по окончании шва приварки наружного ребра с наружной стороны кронштейна 3 (ремонтный вариант с установленной дополнительной накладкой) к корпусу генератора. При наработке  $0,605 \cdot 10^6$  циклов нагружения испытания первой пары кронштейнов 3–4 генератора остановлены.

Вторая пара кронштейнов генератора испытывалась на тех же ступенях нагружения, что и первая пара. На первой ступени нагружения наработка второй пары кронштейнов 1–2 (без появления трещин) составила  $3,105 \cdot 10^6$  циклов. На второй ступени нагружения первая трещина образовалась по окончании шва приварки наружного ребра с наружной стороны кронштейна 1 (кронштейн в первоначальном исполнении завода-изготовителя) к корпусу генератора при наработке  $0,905 \cdot 10^6$  циклов. После наработки  $1,316 \cdot 10^6$  циклов нагружения был осуществлен переход на третью ступень нагружения. При наработке  $0,051 \cdot 10^6$  циклов на кронштейне 2 одновременно появились вторая и третья трещины: по окончании шва приварки наружного ребра с наружной стороны кронштейна к корпусу генератора и на наружном ребре кронштейна по окончании усиливающей накладки. При наработке  $0,228 \cdot 10^6$  циклов нагружения возникла четвертая трещина – с обеих сторон наружного ребра кронштейна 1, в зоне приварки его к опорной планке; при наработке  $0,795 \cdot 10^6$  циклов – пятая трещина – по окончании шва приварки внутреннего ребра с наружной стороны кронштейна 2 к корпусу генератора. При наработке  $1,734 \cdot 10^6$  циклов нагружения произошло разрушение кронштейна 1 по четвертой трещине.

Сравнение прочности различных вариантов исполнения кронштейнов генератора про-

водили путем сопоставления их наработок до появления трещин при одинаковых условиях нагружения.

Используя уравнение кривой усталости (1), пересчитаем наработки, полученные на первой и второй ступенях нагружения, на режим нагружения третьей ступени, где  $P_{\max} = 78,5$  кН для пары кронштейнов. Результаты пересчета наработок испытанных пар кронштейнов генератора ГИВ-25.У1 приведены в таблице.

Анализируя результаты усталостных испытаний двух пар кронштейнов генератора, отмечаем следующее. Разброс результатов усталостных испытаний на двух усиленных кронштейнах до появления первой и третьей трещин составляет до 6,5 раз. Нарботка усиленного кронштейна до возникновения первой трещины равна  $0,145 \cdot 10^6$  циклов, что в 5,2 раза меньше полученной на кронштейне в состоянии поставки завода-изготовителя. Нарботка кронштейна ремонтного варианта в 8,0 раз превышает наработку кронштейна до появления первой трещины усиленного варианта и в 1,5 раза наработку кронштейна в состоянии поставки.

Следует отметить, что наработка кронштейна данного ремонтного варианта образца в 6 раз превышает найденную по результатам ранее выполненного ремонтного варианта (при одинаковых режимах нагружения) кронштейна генератора. Появление трещин на кронштейне ремонтного варианта, кронштейнах, усиленных методом наплавки, и кронштейне в первоначальном исполнении завода-изготовителя при ранее проводившихся испытаниях происходило в зоне радиусной выкружки (переход наклонного участка ребра в горизонтальный).

Доработка кронштейнов генератора путем установки на ребра дополнительной накладки привело к усилению опасного сечения кронштейнов и изменению зоны появления трещин. При наличии в конструкции кронштейна дополнительной накладки зоной образования трещин является шов приварки ребер кронштейна к корпусу генератора.

Для повышения усталостной прочности кронштейнов генератора ГИВ-25.У1 необ-

## Результаты пересчета наработок испытанных пар кронштейнов генератора ГИВ-25.У1

Номер кронштейна	Режим нагружения, кН		Номер трещины	Наработка до появления трещины, циклов	Зона появления трещины и разрушение
	$P_{\min}$	$P_{\max}$			
1	19,6	78,5	1	$0,76 \cdot 10^6$	По окончании шва приварки наружного ребра с наружной стороны кронштейна 1 к корпусу генератора
			2	$1,118 \cdot 10^6$	С обеих сторон наружного ребра кронштейна 1, в зоне приварки его к опорной планке
2			1	$0,941 \cdot 10^6$	По окончании шва приварки наружного ребра с наружной стороны кронштейна 2 к корпусу генератора
			2	$0,941 \cdot 10^6$	На наружном ребре кронштейна 2, по окончании усиливающей накладки (развитие трещины – вверх)
			3	$1,685 \cdot 10^6$	По окончании шва приварки внутреннего ребра с наружной стороны кронштейна 2 к корпусу генератора
Останов испытаний при $2,624 \cdot 10^6$ циклов нагружения					
3	19,6	78,5	1	$1,173 \cdot 10^6$	По окончании шва приварки наружного ребра с наружной стороны кронштейна 3 к корпусу генератора
4			1	$0,144 \cdot 10^6$	По окончании шва приварки наружного ребра с наружной стороны кронштейна 4 к корпусу генератора
			2	$0,374 \cdot 10^6$	По окончании шва приварки внутреннего ребра с наружной стороны кронштейна 4 к корпусу генератора
Останов испытаний при $1,506 \cdot 10^6$ циклов нагружения					

ходимо «разделить» два концентратора напряжений: отверстие на торцевой поверхности корпуса генератора под болт крепления крышки и зону окончания шва приварки ребра кронштейна к корпусу генератора. Например, продлить дополнительную накладку до наружной поверхности корпуса с последующей приваркой к нему, что позволит сместить сварной шов от центра отверстия под болт на величину, равную толщине накладки.

### Испытания кронштейнов генератора ТВГ-35.У1

При статических испытаниях кронштейнов генератора ТВГ-35.У1 определялись напряжения от действия расчетных нагрузок. Генератор закреплялся одновременно на четырех опорах-амортизаторах. Нагружение генератора осуществлялось в трех направлениях (см. рис. 4). Все нагрузки прикладывались в цент-

ре тяжести генератора, расчетные нагрузки по режимам нагружения имели следующие значения:

а) I режим (продольное ускорение  $a_x = 5g$ ):

– вертикальная  $P_v = 7,78$  кН,

– продольная  $P_{Г.пр} = 32,85$  кН;

б) I режим (продольное ускорение  $a_x = 10g$ ):

– вертикальная  $P_v = 9,0$  кН,

– продольная  $P_{Г.пр} = 65,7$  кН;

в) III режим:

– вертикальная  $P_v = 7,88$  кН,

– боковая  $P_{Г.поп} = 2,63$  кН,

– продольная  $P_{Г.пр} = 9,86$  кН.

Тензорезисторы устанавливались на каждом кронштейне в наиболее нагруженных зонах (рис. 6).

При статических испытаниях нагрузки прикладывались к корпусу генератора по отдельности, а полученные напряжения суммировались в соответствии с вышеуказанными режимами.

Анализ величин напряжений, возникающих в кронштейнах генератора ТВГ-35.У1, показывает, что суммарные напряжения от действия статических нагрузок по режимам нагружения не превышают допускаемых значений как для I ( $\sigma_I = 93$  МПа  $<$   $[\sigma]_I = 225$  МПа), так и для III режимов нагружения ( $\sigma_{III} = 40$  МПа  $<$   $[\sigma]_{III} = 165$  МПа).

Усталостные испытания кронштейнов генератора также проводились методом ступенчатого нагружения на двух уровнях динамического нагружения, с постоянным коэффициентом асимметрии, который был принят равным 0,25.

Испытания одновременно четырех кронштейнов генератора осуществлялись на двух ступенях динамического нагружения. На первой ступени режим нагружения был равен:  $P_{min} = 27,0$  кН,  $P_{max} = 107,9$  кН. При наработке примерно  $4 \cdot 10^6$  циклов нагружения (без трещин) перешли на вторую ступень нагружения. На этой ступени режим нагружения составлял:  $P_{min} = 39,2$  кН,  $P_{max} = 157,0$  кН. При наработке  $0,749 \cdot 10^6$  циклов нагружения возникла первая трещина снизу под кронштейном 3, по шву приварки дополнительной накладки к цилиндрической поверхности корпуса генератора со стороны торца корпуса (рис. 7). Развитие трещины происходило по сварному шву приварки накладки к цилиндрической поверхности корпуса генератора. После суммарной наработки 8 млн циклов нагружения не было выявлено появления других трещин и было принято решение об остановке испытаний.

Следует отметить, что сам сварной шов, выполненный вдоль цилиндрической поверхности корпуса генератора, является концентратором напряжений, да еще выходящий на торец корпуса. В связи с этим необходимо рассмотреть вопрос о выполнении сварного шва приварки дополнительной накладки с отступом от торца корпуса на 5–7 мм.

По результатам усталостных испытаний сравнивалась прочность кронштейнов генераторов ТВГ-35.У1 и ГИВ-25.У1 в исполнении завода-изготовителя, усиленных вариантов как методом наплавки, так и путем установки дополнительной накладки. Так как испытания кронштейнов проводились при разных

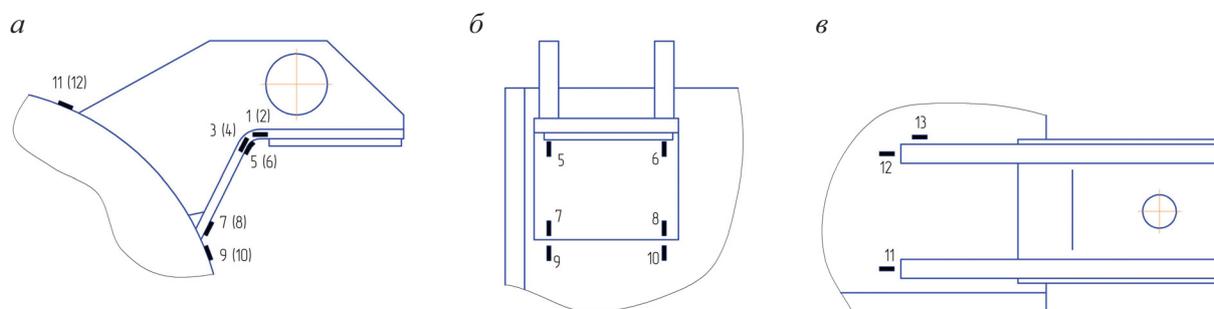


Рис. 6. Схема установки тензорезисторов на кронштейне генератора ТВГ-35.У1:  
а – главный вид; б – вид справа; в – вид сверху

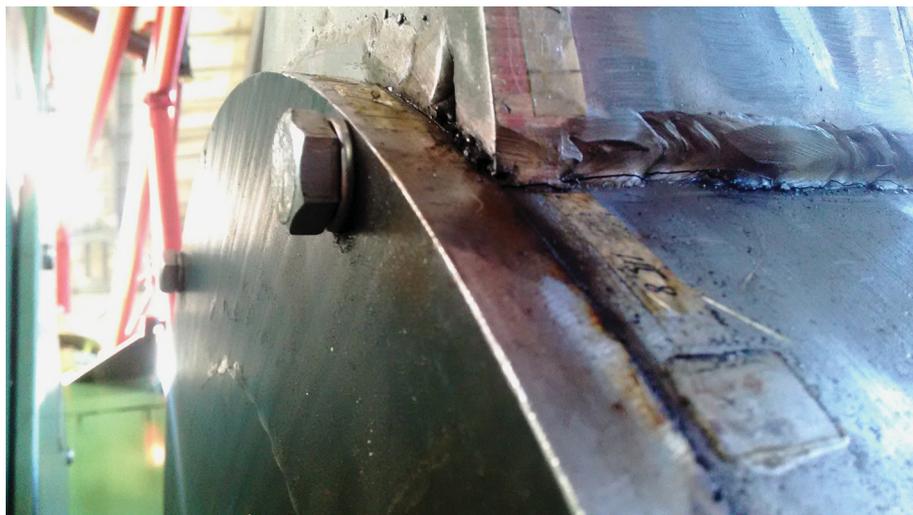


Рис. 7. Трещина по шву приварки дополнительной накладки к цилиндрической поверхности корпуса генератора

режимах нагружения, то для сопоставления результатов использовали уравнение кривой усталости (1), пересчитывая наработки кронштейнов генератора до возникновения трещин на одинаковый режим нагружения:  $P_{\min} = 27,0$  кН,  $P_{\max} = 107,9$  кН.

После расчетов получили значения наработок до появления трещин:

$7,295 \cdot 10^6$  циклов – для кронштейна генератора ТВГ-35.У1;

$2,613 \cdot 10^6$  циклов – для кронштейна генератора ГИВ-25.У1 в исполнении завода-изготовителя;

$2,913 \cdot 10^6$  циклов – для кронштейна генератора ГИВ-25.У1, усиленного наплавкой;

$4,212 \cdot 10^6$  циклов – для кронштейна генератора ГИВ-25.У1, усиленного дополнительной накладкой.

Анализируя результаты усталостных испытаний кронштейнов генератора, отмечаем следующее. Нарботка кронштейна генератора ТВГ-35.У1 в 2,79 раза больше, чем кронштейнов генератора ГИВ-25.У1 в исполнении завода-изготовителя, в 2,5 раза – кронштейна, усиленного наплавкой, и в 1,79 раза – кронштейна, усиленного дополнительной накладкой.

Для сравнения прочности кронштейнов генератора определили условные пределы

выносливости испытанных образцов для базового числа циклов нагружения:

$$P_{r,N_{\text{усл}}} = P_{r_{\text{исп}}} \cdot \sqrt[m]{\frac{N_{\text{исп}}}{N_6}}. \quad (2)$$

В (2)  $P_{r,N_{\text{усл}}}$  – условный предел выносливости;  $P_{r_{\text{исп}}}$  – максимальная нагрузка цикла при испытаниях;  $N_{\text{исп}}$  – количество циклов нагружения до появления трещины;  $N_6 = 10^7$  – базовое число циклов нагружения.

В процессе вычислений с использованием наработок кронштейнов генераторов получены следующие условные пределы выносливости:

$P_{r,N_{\text{усл}}} = 99,67$  кН – для кронштейна генератора ТВГ-35.У1;

$P_{r,N_{\text{усл}}} = 77,11$  кН – для кронштейна генератора ГИВ-25.У1 в исполнении завода-изготовителя;

$P_{r,N_{\text{усл}}} = 79,26$  кН – для кронштейна генератора ГИВ-25.У1, усиленного наплавкой;

$P_{r,N_{\text{усл}}} = 86,92$  кН – для кронштейна генератора ГИВ-25.У1, усиленного дополнительной накладкой.

Возможное минимальное значение условного предела выносливости при вероятности неразрушения  $\alpha$  оценивается по формуле

$$(P_{r, \text{Усл}})_{\min} = P_{r, \text{Усл}} \cdot (1 - v \cdot Z_{\alpha}),$$

в которой  $v$  – коэффициент вариации (принимаем  $v = 0,15$ );  $Z_{\alpha}$  – односторонняя квантиль нормированных отклонений нормального распределения (при  $\alpha = 0,95$ ,  $Z_{\alpha} = 1,645$ ).

Минимальная величина условных пределов выносливости составит:

$(P_{r, \text{Усл}})_{\min} = 75,14$  кН – для кронштейна генератора ТВГ-35.У1;

$(P_{r, \text{Усл}})_{\min} = 58,08$  кН – для кронштейна генератора ГИВ-25.У1 в исполнении завода-изготовителя;

$(P_{r, \text{Усл}})_{\min} = 59,74$  кН – для кронштейна генератора ГИВ-25.У1, усиленного наплавкой;

$(P_{r, \text{Усл}})_{\min} = 65,53$  кН – для кронштейна генератора ГИВ-25.У1, усиленного дополнительной накладкой.

Таким образом, по результатам усталостных испытаний кронштейнов одного образца генератора установлено, что минимальный условный предел выносливости кронштейнов генератора ТВГ-35.У1 (номинальная мощность 32 кВт) равен 75,14 кН, что в 1,29 раза больше, чем кронштейнов генератора ГИВ-25.У1 (номинальная мощность 25 кВт) в исполнении завода-изготовителя, в 1,26 раза – кронштейна, усиленного наплавкой, и в 1,15 раза – кронштейна, усиленного дополнительной накладкой, при одинаковых условиях испытаний.

## Заключение

По результатам испытаний кронштейнов образца генератора ТВГ-35.У1 (номинальная мощность 32 кВт) производства «ТрансПриводТверь» можно сделать следующие выводы:

1) напряжения в кронштейнах генератора от действия расчетных статических нагрузок не превышают допускаемых значений как для I ( $\sigma_I = 93$  МПа  $<$   $[\sigma]_I = 225$  МПа), так и для III режимов нагружения ( $\sigma_{III} = 40$  МПа  $<$   $[\sigma]_{III} = 165$  МПа);

2) выявлена зона появления трещины – начало шва приварки (от торца корпуса генератора) дополнительной накладкой к корпусу;

3) минимальное значение условного предела выносливости кронштейна генератора ТВГ-35.У1 составило 75,14 кН, что в 1,29 раза больше, чем кронштейна генератора ГИВ-25.У1, в исполнении завода-изготовителя при одинаковых условиях испытаний.

Для повышения усталостной прочности крепления кронштейнов генератора считаем целесообразным шов приварки дополнительной накладке начинать с отступом на 5–7 мм от торца корпуса генератора, а также отверстия под болт крепления торцевой крышки генератора отнести от швов приварки дополнительной накладке на 20–30 мм.

## Библиографический список

1. Терешкин Л. В. Приводы генераторов пассажирских вагонов / Л. В. Терешкин. – М. : Транспорт, 1990. – 152 с.
2. Комаров Ю. И. Электроснабжение пассажирских вагонов / Ю. И. Комаров // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2007. – Вып. 1. – С. 41–54.
3. Самошкин С. Л. Исследование системы подвешивания вагонного генератора привода WBA-32/2 пассажирского вагона методом математического моделирования / С. Л. Самошкин, С. А. Соловьев // Вагонный парк. – 2013. – № 3 (72). – С. 50–52.
4. Самошкин С. Л. Универсальный привод систем энергоснабжения пассажирских вагонов / С. Л. Самошкин // Железнодорожный транспорт. – 2003. – № 11. – С. 41–43.
5. Самошкин С. Л. Пути повышения эксплуатационной надежности приводов вагонных генераторов / С. Л. Самошкин, С. А. Соловьев // Тяжелое машиностроение. – 2004. – № 10. – С. 39–43.
6. Гайдено В. Я. Совершенствование приводов генераторов пассажирских вагонов / В. Я. Гайдено, В. Е. Усов, А. М. Краснобаев // Железнодорожный транспорт. – 1989. – № 2. – С. 41–43.
7. ТУ 3371-001-85874002–2009. Генераторы синхронные трехфазные типа ГИВ. Технические условия. – Пенза : ООО «ПензЭлмаш», 2009. – 19 с.
8. Соколов М. М. Контроль динамики железнодорожного подвижного состава / М. М. Соколов,

А. В. Третьяков, И. Г. Марчиладзе. – М. : ИБС-Холдинг, 2007. – 358 с.

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

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

11. РД 24.050.37–95. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества. – М. : ГосНИИВ, 1995. – 101 с.

12. Монтгомери Д. К. Планирование эксперимента и анализ данных / Д. К. Монтгомери; сокр. пер. с англ. В. А. Коптяева. – Л. : Судостроение, 1980. – 384 с.

13. Тензометрия в машиностроении : справ. пособие / под ред. Р. А. Макарова. – М. : Машиностроение, 1975. – 288 с.

14. Москвитин В. В. Циклические нагружения элементов конструкций / В. В. Москвитин. – М. : Наука, 1981. – 344 с.

15. Нормы для расчета и проектирования новых и модернизируемых вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М. : ВНИИВ–ВНИИЖТ, 1983. – 260 с.

## References

1. Tereshkin L. V. *Privody generatorov passazhirskikh vagonov* [Passenger carriages' generator drives]. Moscow, Transport Publ., 1990, 152 p. (In Russian)

2. Komarov Yu. I. *Elektrosnabzhenie passazhirskikh vagonov* [Passenger carriages' electrical power supply]. *Izvestiya Peterb. universiteta putei soobshcheniia* [Proc. of Petersburg Transport University]. Saint Petersburg, Petersburg State Transport University Publ., 2007, issue 1, pp. 41–54. (In Russian)

3. Samoshkin S. L. & Solov'ev S. A. *Issledovanie sistemy podveshivaniia vagonnogo generatora privoda WBA-32/2 passazhirskogo vagona metodom matematicheskogo modelirovaniia* [A study of carriage generator suspension system for WBA-32/2 passenger carriage drive by mathematical simulation method]. *Vagonnyi park* [Wagon fleet], 2013, no. 3 (72), pp. 50–52. (In Russian)

4. Samoshkin S. L. *Universal'nyi privod sistem energosnabzheniia passazhirskikh vagonov* [Universal

drive for passenger carriages' electrical power systems]. *Zhelnodorozhnyi transport* [Railway transport], 2003, no. 11, pp. 41–43. (In Russian)

5. Samoshkin S. L. & Solov'ev S. A. *Puti povyshe-niia ekspluatatsionnoi nadezhnosti privodov vagonnykh generatorov* [Methods for increasing functional reliability of carriage generators' drives]. *Tiazheloe mashinostroenie* [Heavy engineering], 2004, no. 10, pp. 39–43. (In Russian)

6. Gaidenko V. Ya., Usov V. E. & Krasnobaev A. M. *Sovershenstvovanie privodov generatorov passazhirskikh vagonov* [Improving passenger carriages' generator drives]. *Zhelnodorozhnyi transport* [Railway transport], 1989, no. 2, pp. 41–43. (In Russian)

7. *TU 3371-001-85874002-2009. Generatory sinkhronnye trekhfaznye tipa GIV. Tekhnicheskie usloviia* [Technical conditions. GIV-type synchronistic three-phase generators. TU 3371-001-85874002-2009]. Penza, PenzElmash Publ., 2009, 19 p. (In Russian)

8. Sokolov M. M., Tret'iakov A. V. & Marchiladze I. G. *Kontrol' dinamiki zhelezodorozhnogo podvizhnogo sostava* [Dynamic control of railway rolling stock]. Moscow, IBS Holding Publ., 2007, 358 p. (In Russian)

9. Anisimov P. S. *Ispytaniia vagonov* [Carriage testing]. Moscow, Marshrut Publ., 2004, 197 p. (In Russian)

10. Sokolov M. M., Varava V. I. & Levit G. M. *Izmeneniia i kontrol' pri remonte i ekspluatatsii vagonov* [Measurements and control in carriage repair and operation]. Moscow, Transport Publ., 1991, 158 p. (In Russian)

11. *RD 24.050.37–95. Vagony gruzovye i passazhirskie. Metody ispytaniia na prochnost' i khodovye kachestva* [Controlling document RD 24.050.37–95. Cargo and passenger carriages. Methods for strength and riding quality tests]. Moscow, State Scientific Research Institute for Carriage Building (GosNIIV) Publ., 1995, 101 p. (In Russian)

12. Montgomeri D. K. *Planirovanie eksperimenta i analiz dannykh* [Design and Analysis of Experiments]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1980, 384 p. (In Russian)

13. *Tenzometriia v mashinostroenii* [Strain measurement in mechanical engineering]. Reference book. Ed. by R. A. Makarov. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975, 288 p. (In Russian)

14. Moskvitin V. V. *Tsiklicheskie nagruzheniia elementov konstruksii* [Cyclic loading of structural components]. Moscow, Nauka Publ., 1981, 344 p. (In Russian)
15. *Normy dlya rascheta i proektirovaniia novykh i moderniziruemykh vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh)* [Norms for calculation and design of new and modernised carriages for Ways of Communications Ministry 1520-mm gauge railways (non-self-propelled)]. Moscow, All-Union Scientific Research Institute for Carriage Building (VNIIV) – All-Union Scientific Research Institute of Railway Transport (VNIIZhT) Publ., 1983, 260 p. (In Russian)

САМОШКИН Сергей Львович – д-р техн. наук, начальник управления; \*МАКАРОВ Александр Николаевич – инженер, lexx\_mak@mail.ru; ХОМЕНКО Андрей Анатольевич – канд. техн. наук, заведующий лабораторией (ЗАО НО «Тверской институт вагоностроения»); СЕМЕНОВ Павел Юрьевич – генеральный директор (ООО «ТрансПриводТверь»).

УДК 629.424.1

**Е. И. Сквородников**, **А. С. Анисимов**, **В. А. Минаков**, **И. В. Чернышков**

## АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕПЛОВОЗНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Дата поступления: 22.11.2018

Решение о публикации: 21.01.2019

### Аннотация

**Цель:** Выполнить анализ методов расчета количества продуктов сгорания в отработавших газах дизельных двигателей тепловозов при условии совершенного сгорания, неполного сгорания, данных эксперимента и равновесного состава, при этом принимались во внимание тип двигателя внутреннего сгорания, условия протекания и параметры цикла. Применить такие методы контроля экологических характеристик дизелей тепловозов, которые обладали бы высокой надежностью и точностью расчета, были бы наименее дешевыми и трудоемкими. **Методы:** При расчете состава продуктов сгорания учитывались состав топлива и изменение термодинамических параметров рабочего тела в процессе выгорания топлива в цилиндре двигателя. В основу математической модели равновесных концентраций положены уравнения материального баланса и Дальтона. Расчет ведется с определением констант равновесия реакций диссоциаций газов при сгорании топлива. Процесс сгорания топлива рассчитывается на основе уравнений И. И. Вибе или Б. П. Пугачева, учитывающих одно- или двухфазное выделение теплоты. Опытные данные по составу продуктов сгорания сравнивались с полученными в результате аналитической оценки на основе законов выгорания топлива в цилиндре тепловозного двигателя внутреннего сгорания и равновесных концентраций отработавших газов дизелей тепловозов. **Результаты:** Получены экспериментальные данные по выбросам вредных веществ в отработавших газах, позволившие оценить достоверность расчета равновесных концентраций продуктов сгорания топлива при использовании метода равновесного состава. Они могут представлять минимальные нормативные значения для тепловозных дизелей с идеальными техническим состоянием и организацией рабочего цикла дизеля тепловоза. **Практическая значимость:** Реализация предложенного метода позволит выбрать режимы работы дизелей тепловозов, при которых будет наблюдаться их наименьшее воздействие на окружающую среду, повысить качество оценки экологических параметров тепловозов во всем диапазоне нагрузочных режимов дизель-генераторов локомотивов.

**Ключевые слова:** Дизельный двигатель, продукты сгорания, равновесный состав, закон сгорания, воздействие на окружающую среду.

**Evgeniy I. Skovorodnikov**, D. Eng. Sci., professor;\* **Alexandr S. Anisimov**, Cand. Eng. Sci., associate professor, anisimovas1971@mail.ru; **Vitaliy A. Minakov**, senior teacher, vitalya\_13@mail.ru; **Igor V. Chernyshkov**, postgraduate student, chernyshkovigor@yandex.ru (Omsk State Transport University) EVALUATION OF ECOLOGICAL SAFETY OF DIESEL LOCOMOTIVE ENGINES. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-1-118-129

### Summary

**Objective:** Conduct an analysis of the methods for calculation of the amount of combustion products in exhaust gas of diesel locomotive engines under the conditions of perfect combustion, incomplete combustion, experimental data and equilibrium composition, with account taken for the type of internal combustion engine, behaviour conditions and cycle parameters. Apply methods of control over

environmental characteristics of diesel locomotive engines possessing high degree of reliability and accuracy of calculation, and was as cheap and labour-intensive as possible. **Methods:** Composition of fuel and changes in the thermodynamic parameters of operational heat during the process of fuel burn in the engine cylinder were accounted for during the calculation of composition of combustion products. The mathematical model of equilibrium concentrations is based on the material balance equation and the Dalton equation. The calculation process included constant determination for equilibrium for gas dissociation reactions during fuel burn. The process of fuel burn is calculated on the basis of equations by I. I. Vibe and B. P. Pugachev which account for single- and double-phase heat release. Experimental data on the composition of combustion product were compared to the data obtained as a result of analytical estimation on the basis of laws of fuel burn in the cylinder of a diesel locomotive internal combustion engine and equilibrium concentrations of exhaust gases of diesel locomotive engines. **Results:** Experimental data on emissions of hazardous substances in exhaust gases were obtained, which permitted to evaluate the veracity of calculation of equilibrium concentrations of products of combustion when using the equilibrium composition method. They may represent minimum regulation values for locomotive diesels in perfect technical condition and organization of diesel locomotive's work cycle. **Practical importance:** Implementation of the proposed method will permit selecting locomotive diesels' operating regimes that will make the least possible environmental impact, and increase the quality of evaluation of diesel locomotives' environmental parameters across the range of loading regimes of locomotives' diesel generators.

**Keywords:** Diesel engine, combustion products, equilibrium composition, combustion law, environmental impact.

## Введение

Образование продуктов сгорания топлива в цилиндре поршневых двигателей внутреннего сгорания происходит за счет химических реакций окисления составляющих топлива кислородом воздуха, а также в результате соединения кислорода и азота воздуха с химическими элементами топлива и продуктами сгорания. Такие реакции протекают в цилиндре дизеля в течение процесса «сгорание–расширение». К токсичным элементам (вредным веществам) в продуктах сгорания дизельного топлива можно отнести озон  $O_3$ , сажу  $C$ , оксид углерода  $CO$ , оксиды азота  $NO$ ,  $NO_2$ , аммиак  $NH_3$ , диоксид серы  $SO_2$ , сероводород  $H_2S$ , сероуглерод  $CS_2$ , метин  $CH$ , метил  $CH_3$ , формальдегид  $H_2CO$  и 3,4-бенз(а)пирен  $C_{20}H_{12}$ . Средний состав отработавших газов дизелей различного назначения представлен в табл. 1 [1, 2].

Анализ данных, приведенных в табл. 1, дает возможность предположить, что:

– использованы результаты многих известных теоретических и экспериментальных методов, позволивших определить в составе про-

дуктов сгорания девять химических элементов. Утверждение некоторых авторов о том, что в составе отработавших газов дизельных двигателей могут находиться около 200 или 300 элементов, не поддается проверке;

– испытаниям были подвергнуты дизельные двигатели различного конструктивного исполнения и назначения, что, возможно, определило значительный разброс (в некоторых случаях более чем в 100 раз) в результатах контроля, однако основные положения теории двигателей не позволяют дать достаточно объективного объяснения такого существенного расхождения в количестве одноименных продуктов сгорания;

– в продуктах сгорания топлива дизельных двигателей преобладают элементы (более 77%), характеризующие процесс полного сгорания топлива, что не исключает необходимости либо экспериментальной, либо теоретической оценки количества вредных выбросов в продуктах сгорания;

– работа локомотивного хозяйства ОАО «РЖД» в рамках Парижского соглашения, несомненно, потребует постоянного эксплуа-

ТАБЛИЦА 1. Состав отработавших газов дизельных двигателей

Компонент отработавших газов дизеля	Концентрация компонентов в отработавших газах	
	%	г/(кВт·ч)
Азот N <sub>2</sub>	74,0–78,0	–
Кислород O <sub>2</sub>	2,0–18,0	–
Водяной пар H <sub>2</sub> O	0,5–9,0	–
Двуокись углерода CO <sub>2</sub>	1,0–12,0	–
Оксид углерода CO	0,005–0,400	1,50–12,00
Оксид азота NO	0,004–0,500	6,00–18,00
Диоксид азота NO <sub>2</sub>	0,00013–0,0130	0,50–2,00
Сажа С	–	0,25–2,00
3,4-Бенз (а)пирен C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	–	(1,0–2,0)·10 <sup>-6</sup>

тационного мониторинга в области определения и прогнозирования количества не только вредных выбросов, но и парниковых газов в отработавших газах дизельных двигателей с учетом фактических и перспективных объемов перевозок.

### Постановка задачи

В настоящее время контроль экологического воздействия автономных локомотивов (далее, тепловозов) на окружающую среду проводится при нагрузочных реостатных испытаниях локомотивов, когда с помощью специальной измерительной техники определяются состав и удельное количество вредных веществ в отработавших газах дизель-генераторной установки тепловоза при различных режимах ее нагружения.

Масса выбросов  $i$ -го продукта сгорания топлива (кг) при работе дизеля тепловоза за некоторый промежуток времени рассчитывается по уравнению

$$G_{ik} = \sum_{k=0}^{P_k} g_{ik} t_k,$$

где  $P_k$  – количество позиций контроллера машиниста тепловоза;  $g_{ik}$  – удельный выброс  $i$ -го продукта сгорания топлива при работе дизеля

тепловоза на  $k$ -й позиции контроллера машиниста, кг/ч;  $t_k$  – время работы тепловоза на позиции, ч.

Значения нормативных CO<sup>(н)</sup>, удельных CO<sup>(у)</sup> и предельно-допустимых выбросов оксида углерода CO<sup>(уп)</sup> и азота NO<sup>(н)</sup>, NO<sup>(у)</sup>, NO<sup>(уп)</sup> для выбранного режима испытаний для маневровых локомотивов, рассчитанные с учетом эффективной мощности и удельного расхода топлива дизелем для заданных позиций контроллера машиниста (КМ) тепловоза, приведены в табл. 2. Как из нее следует, предельные значения количества вредных выбросов в отработавших газах тепловозов соответствуют представленным в технической документации пунктам экологического контроля. Анализируя данные табл. 2, видно, что в некоторых случаях удельное количество выбросов отдельных элементов превышает их нормативное значение, что практически невозможно для серийных двигателей. Несомненно, что такое несоответствие возможно по причине влияния на экологические характеристики тепловозных дизелей значительного числа случайных факторов, например условий окружающей среды, экономических характеристик дизеля для различных режимов работы, качества протекания и идентичности рабочего цикла по цилиндрам двигателя, учесть которые при проведении испытаний нельзя.

ТАБЛИЦА 2. Нормативные, удельные и предельно-допустимые значения вредных выбросов в отработавших газах тепловозов

Позиция контроллера машиниста	Серия тепловоза	Количество оксида углерода, кг/ч			Количество оксидов азота, кг/ч		
		CO <sup>(н)</sup>	CO <sup>(у)</sup>	CO <sup>(пр)</sup>	NO <sup>(н)</sup>	NO <sup>(у)</sup>	NO <sup>(пр)</sup>
0	ТЭМ18	0,074	0,712	0,113	0,181	0,301	0,712
	ЧМЭЗ	0,185	0,609	1,782	0,767	3,998	0,183
3	ТЭМ18	0,925	0,029	0,772	7,611	4,479	6,892
	ЧМЭЗ	2,549	0,539	1,934	10,886	9,322	6,363
5	ТЭМ18	2,407	3,278	2,772	15,402	14,380	26,807
	ЧМЭЗ	4,697	1,948	2,955	18,834	11,280	15,268
7	ТЭМ18	4,619	9,491	9,951	25,465	29,974	33,871
	ЧМЭЗ	7,303	4,521	6,289	27,795	11,967	28,001
8	ТЭМ18	5,999	13,709	18,855	31,347	39,906	33,871
	ЧМЭЗ	8,778	6,244	9,470	32,561	11,833	35,803

Анализ экспериментальных методов, применяемых в настоящее время для оценки количества вредных веществ в продуктах сгорания углеводородного топлива дизелей тепловозов, выявил, что на сети железных дорог ОАО «Российские железные дороги» отсутствуют методы, способные учесть представленные выше факторы, а также обладающие низкими капитальными и эксплуатационными затратами. Наиболее надежными, точными, дешевыми и наименее трудоемкими следует считать аналитические методы расчета состава продуктов сгорания топлива дизелей тепловозов. Такие методы должны базироваться на химических реакциях окисления топлива кислородом воздуха, поступающего в цилиндр двигателя, и протекающих при высоких переменных во времени объеме, давлениях и температуре.

## Теория

На образование количества горючей смеси  $M$  (кмоль/кг) оказывают влияние теоретически необходимое количество воздуха для сгорания топлива  $L_0$  и коэффициент избытка воздуха  $\alpha$ :

$$M = \alpha L_0 =$$

$$= \alpha(0,397C + 1,19H + 0,149(S - O)),$$

где  $C, H, S, O$  – доли углерода, водорода, серы и кислорода в составе топлива.

В состав продуктов полного сгорания топлива при заданном коэффициенте избытка воздуха для  $i$ -й позиции КМ входят двуокись углерода  $CO_2$ , водяной пар  $H_2O$ , диоксид серы  $SO_2$ , избыточный кислород  $O_2$  и азот  $N_2$ , поступившие с воздухом (кг/ч) [3–5]:

$$M_{CO_2} = 0,083CN_{ei}b_{ei}m_{CO_2}, \quad (1)$$

$$M_{H_2O} = 0,5HN_{ei}b_{ei}m_{H_2O}, \quad (2)$$

$$M_{O_2} = 0,21(\alpha - 1)L_0N_{ei}b_{ei}m_{O_2}, \quad (3)$$

$$M_{SO_2} = 0,0312SN_{ei}b_{ei}m_{SO_2}, \quad (4)$$

$$M_{N_2} = 0,79\alpha L_0N_{ei}b_{ei}m_{N_2}, \quad (5)$$

здесь  $N_{ei}$  – эффективная мощность дизеля на  $i$ -й позиции КМ, кВт;  $b_{ei}$  – удельный эффективный расход топлива дизелем на  $i$ -й позиции КМ, кг/(кВт·ч);  $m_{CO_2}, m_{H_2O}, m_{O_2}, m_{SO_2}$ ,

$m_{N_2}$  – молярные массы двуокиси углерода, водяного пара, избыточного кислорода, диоксида серы и азота соответственно, кг/кмоль.

Выражения (1)–(5) не характеризуют влияние на процесс выгорания топлива таких параметров как продолжительность сгорания, коэффициент избытка воздуха, давление и температуры рабочего тела от времени или угла поворота коленчатого вала дизеля. Предполагается, что процесс сгорания топлива происходит мгновенно, а коэффициент избытка воздуха, давление и температура рабочего тела в цилиндре постоянные и достаточные, чтобы обеспечить полное сгорание топлива. Для ориентировочной оценки работы дизельных двигателей тепловозов и определения максимально возможного количества парниковых газов (двуокись углерода, водяной пар) в продуктах сгорания расчеты, выполненные по формулам (1)–(5), могут быть весьма полезны.

О полноте сгорания топлива в дизеле, т. е. о качестве протекания рабочего цикла, можно судить по результатам сравнения, полученным по (1)–(5), количества продуктов сгорания при определенных значениях  $N_{ei}$  и  $b_{ei}$  с замеренной (каким-либо способом) массой продуктов полного сгорания топлива. Из-за локального недостатка кислорода в зоне горения топлива вследствие несовершенства смесеобразования, скоротечности процесса сгорания при повышении частоты вращения коленчатого вала дизеля, переходных процессов даже при идеальной организации рабочего цикла в цилиндре поршневого двигателя внутреннего сгорания достичь полного сгорания топлива практически невозможно.

В самом общем случае предполагается, что продукты неполного сгорания состоят из углекислого газа  $CO_2$ , оксида углерода  $CO$ , водяного пара  $H_2O$ , водорода  $H_2$ , азота  $N_2$  и его оксидов, кислорода  $O_2$ , небольшого количества метана  $CH_4$  и следов других углеводородов [3–5]. Расчет количества продуктов неполного сгорания топлива ведут по пяти компонентам –  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $H_2O$ ,  $H_2$  и  $N_2$ . Содержанием кислорода, метана и других углеводородов пренебрегают. При общем недостатке воздуха

в цилиндре двигателя, т. е. при коэффициенте избытка воздуха меньше единицы ( $\alpha < 1$ ), для расчета продуктов неполного сгорания используются уравнения

$$M_{CO_2} + M_{CO} = 0,083C,$$

$$M_{H_2O} + M_{H_2} = 0,5H,$$

$$M_{CO_2} + 0,5M_{CO} + 0,5M_{H_2O} = \\ = 0,21\alpha L_0 + 0,0312O,$$

$$M_{N_2} = 0,79\alpha L_0,$$

$$M_{H_2} = M_{CO} \times \\ \times \left[ -12,01 \left( \frac{H}{C} \right)^2 + 7,22 \left( \frac{H}{C} \right) - 0,436 \right].$$

Сотрудниками кафедры «Локомотивы» Омского государственного университета путей сообщения для оценки экологических характеристик тепловозных дизелей предложена методика расчета на основе метода равновесного состава [6–9], преимущества которой состоят в следующем:

1) учитывается элементарный химический состав топлива;

2) состав и количество элементов в продуктах сгорания определяются с учетом изменения давления, температуры и других термодинамических параметров рабочего тела и прочих параметров работы дизеля в процессе выгорания топлива;

3) состав и количество продуктов сгорания топлива находятся для заданной полноты сгорания топлива в цилиндре двигателя.

Согласно [6, 10], в составе отработавших газов при сгорании дизельного топлива может содержаться до 36 элементов. Для определения количества этих элементов используются уравнения материального баланса

$$S_P = S_S S_C^{-1} = 0,3746SC^{-1}, \quad (6)$$

$$\gamma_P = S_C S_H^{-1} = 0,0839CH^{-1}, \quad (7)$$

$$\alpha_p = \alpha S_C S_O^{-1} = \left( 2 + \frac{1}{2\gamma_p} \right)^{-1}, \quad (8)$$

$$\beta_p = S_O S_N^{-1} = 1,1082 \cdot (0,21 + O) \quad (9)$$

и закон Дальтона

$$P_j = \sum_{i=1}^n P_{ji}. \quad (10)$$

В (6)–(10)  $S_O, S_N, S_C, S_H, S_S$  – количество атомов кислорода, азота, углерода, водорода и серы в продуктах сгорания соответственно,  $n$  – количество элементов в продуктах сгорания топлива,  $P_{ji}$  – парциальное давление  $i$ -го продукта сгорания для  $j$ -й фазы сгорания, Па.

Для каждой  $j$ -й фазы сгорания и каждого  $i$ -го продукта сгорания массу соответствующих элементов можно выразить через их парциальные давления. Тогда уравнения равновесия (6)–(9) будут иметь вид

$$\begin{aligned} \alpha & \left( P_{CO_2} + P_{CO} + P_C + 2P_{C_2} + P_{CH_4} + P_{COS} + P_{CN} + P_{CH} + P_{CH_2} + \right. \\ & \left. + P_{CH_3} + P_{HCO} + P_{H_2CO} + 2P_{C_2H} + 2P_{C_2H_2} + P_{HCN} + P_{CS_2} \right) = \\ & = \alpha_p \left( 2P_{O_2} + P_O + 3P_{O_3} + P_{OH} + P_{H_2O} + \right. \\ & \left. + 2P_{CO_2} + P_{CO} + P_{NO} + 2P_{NO_2} + P_{COS} + P_{HCO} + P_{H_2CO} + \right. \\ & \left. + P_{SO} + 2P_{SO_2} + 3P_{SO_3} + P_{S_2O} \right), \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \beta_p & \left( P_N + 2P_{N_2} + P_{NO} + P_{NO_2} + P_{CN} + P_{NH_3} + P_{HCN} + P_{NS} \right) = \\ & = 2P_{O_2} + P_O + 3P_{O_3} + P_{OH} + P_{H_2O} + 2P_{CO_2} + P_{CO} + P_{NO} + 2P_{NO_2} + \\ & + P_{COS} + P_{HCO} + P_{H_2CO} + P_{SO} + 2P_{SO_2} + 3P_{SO_3} + P_{S_2O}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \gamma_p & \left( P_H + 2P_{H_2} + P_{OH} + 2P_{H_2O} + 4P_{CH_4} + P_{CH_3} + 2P_{CH_2} + 3P_{CH_3} + \right. \\ & \left. + P_{HCO} + 2P_{H_2CO} + P_{C_2H} + 2P_{C_2H_2} + 3P_{NH_3} + P_{HCN} + P_{HS} + 2P_{H_2S} \right) = \\ & = P_C + 2P_{C_2} + P_{CO} + P_{CO_2} + P_{CH_4} + P_{COS} + P_{CN} + P_{CH} + P_{CH_2} + \\ & + P_{CH_3} + P_{HCO} + P_{H_2CO} + 2P_{C_2H} + 2P_{C_2H_2} + P_{HCN} + P_{CS_2}, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} S_p & \left( P_C + 2P_{C_2} + P_{CO} + P_{CO_2} + P_{CH_4} + P_{COS_3} + P_{CN} + P_{CH} + P_{CH_2} + \right. \\ & \left. + P_{CH_3} + P_{HCO} + P_{H_2CO} + 2P_{C_2H} + 2P_{C_2H_2} + P_{HCN} + P_{CS_2} \right) = P_{COS} + \\ & + P_S + 2P_{S_2} + P_{SO} + P_{SO_2} + P_{SO_3} + 2P_{S_2O} + P_{HS} + P_{H_2S} + P_{NS} + 2P_{CS_2}. \end{aligned} \quad (14)$$

Связь между средним давлением рабочего тела в цилиндре двигателя в  $j$ -й момент сгорания и парциальным давлением отдельных компонентов смеси выражается уравнением Дальтона

$$\begin{aligned} P_j & = P_O + P_H + P_C + P_N + P_S + P_{O_2} + P_{O_3} + P_{H_2} + P_{OH} + P_{H_2O} + \\ & + P_{CO} + P_{CO_2} + P_{C_2} + P_{CH_4} + P_{N_2} + P_{NO} + P_{NO_2} + P_{COS} + P_{CN} + \\ & + P_{CH} + P_{CH_2} + P_{CH_3} + P_{HCO} + P_{H_2CO} + P_{C_2H} + P_{C_2H_2} + P_{NH_3} + \\ & + P_{HCN} + P_{S_2} + P_{SO} + P_{SO_2} + P_{SO_3} + P_{S_2O} + P_{HS} + P_{H_2S} + P_{NS} + P_{CS_2}. \end{aligned} \quad (15)$$

Парциальные давления продуктов сгорания находятся в результате решения системы уравнений (11)–(15). Для этого предварительно рассчитывают константы равновесия реакций диссоциации газов при сгорании топлива, представляющие собой отношение парциальных давлений отдельных элементов смеси, например для диоксида углерода

$$K_{\text{CO}_2} = P_C P_O^2 P_{\text{CO}_2}^{-1}.$$

Константы равновесия реакций диссоциации газов определяются для заданной температуры сгорания по выражению [10]

$$\begin{aligned} \log K_{ij} = & K_0 + K' \ln X + K_{-2} X^{-2} + \\ & + K_{-1} X^{-1} + K_1 X + K_2 X^2 + \\ & + K_3 X^3 + K_4 X^4 + K_5 X^5 + K_6 X^6 + K_7 X^7, \end{aligned}$$

где  $X = T_j / 10\,000$  – температура рабочего тела в цилиндре двигателя в  $j$ -й момент процесса сгорания топлива, К.

Для решения системы (11)–(15) может быть использован метод, описанный в работе [11]: обе части каждого уравнения логарифмируются и раскладываются в ряд Тейлора, полагая неизвестными логарифмы парциальных давлений смеси. При этом члены разложения второго и большего порядков не учитываются. В результате расчет сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений относительно логарифмов неизвестных парциальных давлений.

Количество каждого продукта сгорания топлива (кг) для любого произвольного момента процесса сгорания вычисляется с использованием уравнения состояния идеальных газов

$$m_{ji} = \frac{\mu_i P_{ji} V_j}{8314 T_j},$$

здесь  $\mu_i$  – молярная масса продукта сгорания, кг/кмоль;  $V_j, T_j$  – объем, м<sup>3</sup>, и температура рабочего тела, К, в любой произвольный момент процесса сгорания соответственно.

Просуммировав количество продуктов сгорания по углу поворота коленчатого вала от начала до окончания сгорания топлива, можно определить массу  $i$ -го продукта сгорания

$$m_i = \sum_{j=0}^{j=\varphi_z} m_{ji}$$

и общую массу газов за рабочий цикл двигателя

$$M_1 = \sum_{i=1}^n m_i,$$

где  $\varphi_z$  – продолжительность сгорания топлива.

Изменение объема, давления, температуры рабочего тела, доли сгоревшего топлива и коэффициента избытка воздуха в цилиндре двигателя для изучаемого интервала времени  $j_{i+1} - j_1$  происходит вследствие выделения тепла при сгорании топлива, теплообмена рабочего тела со стенками цилиндра, изменения состава рабочего тела и т. д.

Для расчета параметров процесса выгорания топлива в цилиндре двигателя используются различные законы сгорания, например закон сгорания Вибе [7–9, 12]

$$x_j = 1 - e^{-6,908 \left( \frac{\varphi}{\varphi_z} \right)^{m+1}},$$

в котором  $x_j$  – доля топлива, сгоревшего к моменту времени  $j$ ;  $\varphi_z$  – продолжительность сгорания;  $m$  – показатель характера сгорания, или уравнения двухфазного тепловыделения Б. П. Пугачева [3]

$$\frac{dx}{d\varphi} = \frac{x_1}{\varphi_1^2} \varphi e^{-\frac{\varphi^2}{2\varphi_1^2}} + \frac{x_2}{\varphi_2^2} \varphi e^{-\frac{\varphi^2}{2\varphi_2^2}},$$

где  $x_1$  – доля тепла, выделившегося в первой фазе;  $x_2$  – доля тепла, выделившегося во второй фазе;  $\varphi_1$  – продолжительность от начала сгорания до момента максимальной скорости тепловыделения в первой фазе, с;  $\varphi_2$  – продолжительность от начала сгорания до момента

максимальной скорости тепловыделения во второй фазе, с.

Процесс сгорания разбивается на интервалы времени (интервалы угла поворота коленчатого вала), а термодинамические параметры – давление и температура газов в конце каждого интервала – определяются по известным значениям давления и температуры в начале интервала при изменении объема цилиндра от  $v_i$  до  $v_{i+1}$ . Для момента начала сгорания удельный объем рабочего тела рассчитывается с учетом угла опережения подачи и периода задержки воспламенения топлива.

Применив метод равновесного состава и параметры процесса выгорания топлива в цилиндре двигателя, было установлено количество продуктов сгорания топлива для дизеля 6ЧН31,6/33 для номинального режима работы. В табл. 3 не включены продукты сгорания, количество которых в отработавших газах не превышает  $10^{-20}$  кг/ч: это метан, сероокись азота, метин, метилен, этинил и другие элементы.

Таким образом, использование математической модели, оценивающей изменение параметров выгорания топлива в цилиндре двигателя, и метода расчета продуктов сгорания топлива по условиям равновесия позволит отказаться от газоанализаторов, обеспечить

оперативность экологического контроля, оценить техническое состояние транспортных двигателей и качество протекания рабочего процесса в цилиндре двигателя.

### Результаты экспериментов

Одной из важнейших проблем при разработке метода аналитического контроля экологической безопасности транспортных двигателей является проблема оценки достоверности результатов расчета, т. е. оценки адекватности предложенной математической модели.

Несомненно, что наиболее объективные сравнительные характеристики могут быть получены при проведении эксплуатационных испытаний и теоретических расчетов для абсолютно идентичных условий. Однако сейчас такие испытания провести невозможно по причине ограниченности методов контроля вредных выбросов. Очевидно, что одним из наиболее объективных методов оценки достоверности методики расчета количества продуктов сгорания по условиям равновесного состава является наличие фактических, абсолютно достоверных, значений выбросов (хотя бы для некоторых элементов) для известных удельных расходов топлива, мощ-

ТАБЛИЦА 3. Количество продуктов сгорания топлива в дизеле

Наименование продуктов сгорания	Количество продуктов сгорания, кг/ч	Наименование продуктов сгорания	Количество продуктов сгорания, кг/ч
Кислород $O_2$	$8,9095 \cdot 10^2$	Оксид азота NO	$5,5976 \cdot 10^0$
Озон $O_3$	$1,2247 \cdot 10^{-5}$	Диоксид азота $NO_2$	$0,3789 \cdot 10^0$
Водород $H_2$	$2,1444 \cdot 10^0$	Циан CN	$2,2123 \cdot 10^{-18}$
Гидроксил OH	$5,6553 \cdot 10^{-2}$	Формил HCO	$1,3984 \cdot 10^{-11}$
Вода $H_2O$	$9,6511 \cdot 10^1$	Формальдегид $H_2CO$	$4,6094 \cdot 10^{-15}$
Диоксид углерода $CO_2$	$2,4588 \cdot 10^2$	Аммиак $NH_3$	$1,2539 \cdot 10^{-10}$
Оксид углерода CO	$6,6939 \cdot 10^{-4}$	Синильная кислота HCN	$1,2330 \cdot 10^{-16}$
Одноатомный углерод C	$0,1750 \cdot 10^0$	Двухатомная сера $S_2$	$1,4528 \cdot 10^0$
Двухатомный азот $N_2$	$4,7558 \cdot 10^3$	Оксид серы SO	$1,3344 \cdot 10^{-15}$
Одноатомный азот N	$1,0542 \cdot 10^{-10}$	Диоксид серы $SO_2$	$1,7553 \cdot 10^{-9}$

ности дизеля и параметров окружающей среды при испытании тепловозов. Как показали теоретические исследования, таких данных в технической литературе в настоящее время нет.

В связи с этим достоверность результатов расчета оценивалась по следующим этапам.

Сначала сравниваются количества водяных паров  $H_2O$ , молекулярного кислорода  $O_2$ , диоксида углерода  $CO_2$  и азота  $N_2$ , рассчитанные по условию полного сгорания топлива в цилиндре двигателя и по условию равновесия. Суммарная концентрация водяных паров  $H_2O$ , диоксида углерода  $CO_2$ , кислорода  $O_2$  и азота  $N_2$  в отработавших газах, полученная по условиям равновесия, составляет около 98% от их общего количества для номинального режима работы дизеля 6ЧН31,6/33 (табл. 4).

Количества  $N_2$  и  $O_2$ , рассчитанные по условиям равновесия, находятся в пределах минимальных и максимальных статистических значений, водяных паров  $H_2O$  и диоксида углерода  $CO_2$  в продуктах сгорания – незначительно превышают минимально возможные, определенные экспериментальными методами (см. табл. 1).

Анализируя вредные выбросы, представленные в табл. 5, можно увидеть, что количества углерода (сажи)  $C$ , оксида азота  $NO$  и диоксида азота  $NO_2$  в продуктах сгорания топлива дизельных двигателей, полученные методом равновесного состава, хорошо согласуются с минимальными экспериментальными значениями [8]. Максимальная ошибка на режиме номинальной мощности составляет 5–6%.

ТАБЛИЦА 4. Сравнительная характеристика методов контроля экологических характеристик дизельных двигателей

Наименование продукта сгорания	Рассчитанное значение, %	
	Полное сгорание	Равновесный состав
Углекислый газ $CO_2$	7,41	3,83
Водяной пар $H_2O$	2,94	1,50
Кислород $O_2$	14,73	14,80
Азот $N_2$	74,89	77,21

ТАБЛИЦА 5. Сравнительная характеристика методов контроля вредных выбросов дизельных двигателей

Наименование продукта сгорания		Данные эксперимента, кг/ч	Расчетное значение по методу равновесного состава, кг/ч
Углерод (сажа) $C$	$C_{min}$	0,221	0,205
	$C_{max}$	1,766	
Оксид азота $NO$	$NO_{min}$	5,298	5,598
	$NO_{max}$	15,895	
Двуокись азота $NO_2$	$NO_{2 min}$	0,442	0,379
	$NO_{2 max}$	1,766	
Оксид углерода $CO$	$CO_{min}$	0,308	0,0007
	$CO_{max}$	24,640	

## Обсуждение результатов

Образование оксида углерода в отработавших газах дизелей возможно при глобальном или локальном недостатке кислорода в камере сгорания, т. е. снижении коэффициента избытка воздуха ниже нормативных значений, и в первую очередь по причине уменьшения величины свежего заряда цилиндра из-за низкой эффективности работы агрегатов наддува (дизели с наддувом) и воздухоохладителей или увеличения гидравлического сопротивления системы впуска (дизели с наддувом и без него).

Количество окиси углерода CO, рассчитанное по условиям равновесия, значительно меньше, чем приведены для данных эксперимента (табл. 5). Как уже выше отмечалось, появление оксида углерода в отработавших газах транспортных двигателей (особенно в больших количествах) может происходить только при работе в переходных режимах, поэтому для установившегося режима такое удельное количество CO как 0,00067 кг/ч, найденное методом равновесного состава, следует считать вполне объективным и достоверным.

С одной стороны, результаты расчета количества продуктов сгорания, полученные при использовании метода равновесного состава, несколько идеализированы и могут представлять минимальные нормативные значения для тепловозных дизелей с идеальными техническим состоянием и организацией рабочего цикла. С другой стороны, анализ периодической литературы, отражающей проблемы экологии транспортных двигателей, показывает, что в ряде европейских стран, например в Германии, оксид углерода в отработавших газах дизельных двигателей не подвергается контролю из-за незначительного его количества и постоянного окисления в диоксид углерода в процессах расширения и выпуска.

## Заключение

В результате анализа теоретических и статистических исследований, приведенных в

настоящей работе и технической литературе, посвященной проблеме экологического воздействия тепловозных и других типов двигателей внутреннего сгорания на окружающую среду, можно сделать следующие выводы:

1) оценка экологической безопасности транспортных двигателей и разработка мероприятий, позволяющих снизить уровень вредных выбросов, отрицательно воздействующих на человека и окружающую среду, есть проблема государственная и не менее актуальная, чем экономия топливно-энергетических ресурсов на транспорте;

2) в настоящее время в системе ОАО «РЖД» нет достаточно эффективных сравнительно недорогих экспериментальных и аналитических средств и методов оценки стационарных и эксплуатационных экологических характеристик серийных тепловозов, базирующихся на основных технико-экономических параметрах дизель-генераторных установок;

3) результаты экологического контроля тепловозного парка, проведенного в некоторых локомотивных депо, имеют низкую достоверность и не учитываются в системе планово-предупредительных ремонтов и в региональных экологических комитетах при разработке природоохранных мероприятий;

4) для более эффективного использования в локомотивных депо экологического контроля требуется разработка определенного программного обеспечения, позволяющего по результатам контроля выполнять полную статистическую обработку информации;

5) на основании проведенных теоретических расчетов и статистических исследований можно рекомендовать для оценки экологических характеристик тепловозных дизелей применять метод равновесного состава;

6) исходными данными для реализации метода равновесного состава должны являться результаты как полномасштабных реостатных испытаний на контролируемых позициях КМ, так и математического моделирования параметров рабочего цикла двигателя, выполненного с учетом установленного угла опережения по-

дачи топлива и выбранного закона выгорания топлива;

7) использование метода равновесного состава, исходных данных для его реализации и его алгоритмическое и программное обеспечение позволят:

- уменьшить эксплуатационные расходы и повысить качество оценки экологических параметров тепловозов;
- сформировать и периодически корректировать базу данных, включающую технико-экономические и экологические параметры тепловозов во всем диапазоне эксплуатационных нагрузочных режимов;
- наметить пути дальнейшего совершенствования методики для расчета количества продуктов сгорания топлива в цилиндре двигателя с целью адаптации результатов в систему ремонта локомотивов по техническому состоянию.

### Библиографический список

1. Марков В. А. Токсичность отработавших газов дизелей / В. А. Марков, Р. М. Баширов, И. И. Габитов. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 376 с.
2. Новиков Л. А. Уровень и перспективы снижения токсичности и дымности судовых, тепловозных и промышленных дизелей : Обзор / Л. А. Новиков, В. И. Смайлис. – М.: ЦНИИТЭИтяжмаш, 1990. – 28 с.
3. Кавтарадзе Р. З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы / Р. З. Кавтарадзе. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 720 с.
4. Симсон А. Э. Тепловозные двигатели внутреннего сгорания / А. Э. Симсон, А. З. Хомич, А. А. Куриц и др. – М. : Транспорт, 1987. – 513 с.
5. Ванштейдт В. А. Дизели : справочник / В. А. Ванштейдт, Н. И. Иванченко, Л. К. Коллеров. – Л. : Машиностроение, 1977. – 479 с.
6. Звонов В. А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания / В. А. Звонов. – М. : Машиностроение, 1981. – 159 с.
7. Володин А. И. Комплексный анализ термодинамических, экономических и экологических характеристик тепловозных дизелей в условиях экс-

плуатации : монография / А. И. Володин, Е. И. Сквородников, А. С. Анисимов. – Омск : Омск. гос. ун-т путей сообщения, 2011. – 166 с.

8. Методы оценки технического состояния, эксплуатационной экономичности и экологической безопасности дизельных локомотивов / под ред. А. И. Володина. – М. : Желдориздат, 2007. – 264 с.

9. Сквородников Е. И. Методы оценки и пути снижения экологического воздействия тепловозных дизелей на окружающую среду / Е. И. Сквородников. – Омск : Омск. гос. академия путей сообщения, 1995. – 104 с.

10. Гурвич Л. В. Термодинамические свойства индивидуальных веществ / Л. В. Гурвич. – М. : Наука, 1962. – 1480 с.

11. Карп И. Н. Продукты сгорания природного газа при высоких температурах (состав и термодинамические свойства) / И. Н. Карп, Б. С. Сорока, Л. Н. Дашевский, С. Д. Семеркина. – Киев : Техника, 1967. – 382 с.

12. Вибе И. И. Новое о рабочем цикле двигателей / И. И. Вибе. – М. ; Свердловск : Машгиз, 1962. – 270 с.

### References

1. Markov V. A., Bashirov R. M. & Gabitov I. I. *Toxichnost' otrabotavshikh gazov dizelei* [Toxicity of diesel engine emissions]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2002, 376 p. (In Russian)
2. Novikov L. A. & Smailis V. I. *Uroven' i perspektivy snizheniia toksichnosti i dymnosti sudovykh, teplovozykh i promyshlennykh dizelei. Obzor* [Level and the prospects for reducing toxicity and smokiness of marine, locomotive and industrial diesels. Review]. Moscow, Central Sci. Research Inst. of Information and Tech. and Econ. Studies in Heavy and Transport Engineering Publ., 1990, 28 p. (In Russian)
3. Kavtaradze R. Z. *Teoriia porshnevykh dvigatelei. Spetsial'nye glavy* [Piston engines theory. Special chapters]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2008, 720 p. (In Russian)
4. Simson A. E., Khomich A. Z., Kurits A. A. et al. *Teplovozyne dvigateli vnutrennego sgoraniia* [Internal-combustion diesel engines]. Moscow, Transport Publ., 1987, 513 p. (In Russian)

5. Vanshteidt V.A., Ivanchenko N.I. & Kolle-rov L.K. *Dizeli. Spravochnik* [*Diesels. Reference book*]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1977, 479 p. (In Russian)
6. Zvonov V.A. *Toksichnost' dvigatelei vnutrennego sgoraniia* [*Internal-combustion engines' toxicity*]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981, 160 p. (In Russian)
7. Volodin A. I., Skovorodnikov E. I. & Anisimov A. S. *Kompleksnyi analiz termodinamicheskikh, ekonomicheskikh i ekologicheskikh kharakteristik teplovoznnykh dizelei v usloviakh ekspluatatsii* [*Complex analysis of thermodynamic, economic and environmental characteristics of locomotive diesels under operational conditions*]. Omsk, Omsk State Transport University Publ., 2011, 166 p. (In Russian)
8. *Metody otsenki tekhnicheskogo sostoiianiia, ekspluatatsionnoi ekonomichnosti i ekologicheskoi bezopasnosti dizel'nykh lokomotivov* [*Methods for assessing the technical condition, operational efficiency and environmental safety of diesel locomotives*]. Ed. by A. I. Volodin. Moscow, Zheldorizdat Publ., 2007, 264 p. (In Russian)
9. Skovorodnikov E. I. *Metody otsenki i puti snizheniia ekologicheskogo vozdeistviia teplovoznnykh dizelei na okruzhaushchuiu sredu* [*Assessment methods and ways of reduction of diesel locomotive engines' environmental impact*]. Omsk, Omsk State Academy of Communications Publ., 1995, 104 p. (In Russian)
10. Gurvich L. V. *Termodinamicheskie svoistva individual'nykh veshchestv* [*Thermodynamic properties of individual substances*]. Moscow, Nauka Publ., 1962, 1480 p. (In Russian)
11. Karp I. N., Soroka B. S., Dashevskii L. N. & Semerkina S. D. *Produkty sgoraniia prirodnogo gaza pri vysokikh temperaturakh* [*Combustion products of natural gas at high temperatures*]. Kiev, Tekhnika Publ., 1967, 382 p. (In Russian)
12. Vibe I. I. *Novoe o rabochem tsikle dvigatelei* [*New on engines' work cycle*]. Moscow, Sverdlovsk, Mashgiz Publ., 1962, 270 p. (In Russian)

СКОВОРОДНИКОВ Евгений Иванович – д-р техн. наук, профессор; \*АНИСИМОВ Александр Сергеевич – канд. техн. наук, доцент, anisimovas1971@mail.ru; МИНАКОВ Виталий Анатольевич – старший преподаватель, vitalya\_13@mail.ru; ЧЕРНЫШКОВ Игорь Владимирович – аспирант, chernyshkovigor@yandex.ru (Омский государственный университет путей сообщения).

УДК 656.025.6

**М. Л. Тонкова****ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КОММЕРЧЕСКОГО  
ОСМОТРА ПОЕЗДОВ И ВАГОНОВ**

Дата поступления: 24.12.2018

Решение о публикации: 01.02.2019

**Аннотация**

**Цель:** Рассмотреть ряд преимуществ автоматизированных систем коммерческого осмотра поездов и вагонов (АСКО ПВ), выявить сложности и проблемы, которые могут возникнуть у транспортных компаний при введении в эксплуатацию таких систем. **Методы:** Проведены обзорный анализ рыночных предложений компаний, предоставляющих рассматриваемую продукцию, сравнение технических характеристик АСКО ПВ и АСКО ПВ 3D, проанализированы конкурентные преимущества каждой из рассматриваемых автоматизированных систем. **Результаты:** Анализируя рыночные предложения компаний, занимающихся установкой исследуемых автоматических систем, выделен наиболее значимый функционал, позволяющий говорить о введении в эксплуатацию автоматических систем как об инновационном решении. Описаны основные конкурентные преимущества и достоинства данных инновационных технологий, свидетельствующие о важности повсеместной установки автоматических систем коммерческого осмотра поездов и вагонов АСКО ПВ и АСКО ПВ 3D. Выделены проблемы и сложности, которые могут возникнуть у желающих их ввести в эксплуатацию транспортных компаний. Проблемы установки автоматических систем затрагивают как финансовую сторону вопроса, так и исключительно техническую невозможность установки их на некоторых железнодорожных станциях ввиду несовпадения габаритов помещения и оборудования. Также не стоит забывать о необходимости выделения дополнительных средств компаниями для обучения работы с этими системами технического персонала. **Практическая значимость:** Повсеместное введение в эксплуатацию автоматизированных систем коммерческого осмотра поездов и вагонов позволит совершить качественный рынок компаниям отрасли грузовых перевозок, значительно повысив как качество и скорость обслуживания, так и безопасность грузоперевозок.

**Ключевые слова:** Автоматизированная система, средства контроля, обнаружение неисправностей, АСКО ПВ, АСКО ПВ 3D, машинное зрение, цифровая железная дорога, транспортная отрасль, железнодорожный транспорт, железнодорожная станция.

**Maria L. Tonkova**, postgraduate student, marie.tonkova@gmail.com (Petersburg State Transport University) INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR COMMERCIAL INSPECTION OF TRAINS AND CARRIAGES. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-1-130-138

**Summary**

**Objective:** Consider a number of advantages of automatic train and carriage commercial inspection systems, identify the difficulties and problems that may arise for transport companies with the commissioning of these systems. **Methods:** A general review of market offers of the companies providing the products in question was conducted. A comparison was made of the technical characteristics of automatic train and carriage commercial inspection systems and its 3D version, and the competitive advantages of each of the automated systems were analysed. **Results:** The most significant functionality was highlighted through analysis of market offers of companies engaged in the installation of the automatic systems being studied, which allows us to speak of introduction of automatic systems into

operation as an innovative solution. In the course of the study, the main competitive and innovative advantages were considered, with evidence supporting the importance of installation of automated systems for commercial inspection of trains and carriages and its 3D version. Problems and difficulties that may arise for transport companies wishing to put into operation these innovative technologies were outlined. Problems of installing automatic systems affect both the financial side of the issue, and the purely technical impossibility of installing the systems at some railway stations due to the discrepancy between the dimensions of the premises and the equipment. The companies also need to allocate additional funds to teach the technical personnel how to operate the new system. **Practical importance:** Widespread commissioning of automatic commercial inspection systems for trains and carriages will allow the freight industry companies to make a leap forward, significantly increasing both the quality and speed of service, and the safety of cargo transportation.

**Keywords:** Automatic system, control facilities, fault detection, automatic train and carriage commercial inspection system, 3D automatic train and carriage commercial inspection system, computer vision, digital railway, transport industry, railway transport, railway station.

Объем грузооборота железнодорожного транспорта в России постоянно растет. Так, прирост за период с января по сентябрь 2018 г. по сравнению с таким же периодом 2017 г. составил +4,2% (с 2354 до 2453,6 млрд тарифных тонно-км) [1]. В связи с увеличением объемов перевозок грузов растут требования к повышению пропускной способности железнодорожных станций, ускорению продвижения вагонопотоков и соответственно большей скорости доставки грузов, сохранности грузов, своевременному выявлению неисправностей, соблюдению правил охраны труда сотрудников железнодорожной области. Для решения указанных задач вводятся новые технологии, которые позволяют автоматизировать часть технологических процессов, связанных с обработкой данных о проходящих грузовых составах на железнодорожных станциях.

В условиях рыночной экономики введение инновационных технологий уже не роскошь, а простая необходимость, позволяющая компании занять свою нишу и не быть вытесненной конкурентами, а также привлечь новых клиентов. Так, инновации в области грузовых перевозок приводят не только к ускорению самого процесса переправки груза из точки А в точку Б, но и к снижению издержек, что может способствовать уменьшению цены на услуги транспортной компании и, как следствие, увеличению спроса. Также немаловажно то, что

инновационные технологии в логистике повышают безопасность процесса грузоперевозок и понижают пагубное влияние применяемых технологий на окружающую среду.

В 2016 г. была разработана программа инновационного развития холдинга «Российские железные дороги» на период 2016–2020 гг., одной из приоритетных задач была реализация комплексного научно-технического проекта «Цифровая железная дорога» (ЦЖД). Достигнутые результаты по ряду направлений уже превышают мировой уровень [2]. Многие результаты были продемонстрированы на крупнейшей железнодорожной выставке мира InnoTrans (ИнноТранс) в Берлине 18 сентября 2018 г. Например, компания «2050» презентовала «Цифровой двойник производства», призванный обеспечить гибкое и оперативное реагирование на запросы заказчика в сфере железнодорожных перевозок [3].

Анализ ряда других документов, таких как «Глобальное видение развития железнодорожного транспорта» (GVRD, Международный совет по железнодорожным исследованиям (ICRR, 2014)), «Задачи–2050. Видение железнодорожного сектора и техническая стратегия развития железнодорожной отрасли Европы будущего» (UIC, 2014), показывает, что к ключевым трендам развития железнодорожной отрасли наряду с инновационными энерго- и ресурсоэффективными системами для под-

вижного состава и инфраструктуры относится создание «умной» железной дороги [4]. Цель, объединяющая все эти документы, – достижение высокого уровня конкурентоспособности железнодорожного транспорта на глобальном рынке транспортных услуг за счет внедрения современных цифровых технологий. Реализовать это возможно, в том числе и привлекая инвесторов [5].

Исследование ARUP «Будущее железных дорог 2050» дает следующий прогноз для сферы железнодорожных перевозок с учетом внедрения инноваций: «Для грузовых железнодорожных перевозок улучшение времени транзита и последовательная надежность являются ключевыми для жизнеспособности железнодорожной отрасли в долгосрочной перспективе. Перемещение грузов по железной дороге уже давно стало более экономичным, чем перемещение грузов по автодороге. К 2050 году конкурентоспособные цены, более желательные временные интервалы, хорошее качество подвижного состава, большие данные, отличный сервис для клиента, а также сокращение задержек на границе будут обеспечивать грузовым железнодорожным перевозкам светлое будущее» [6].

Одна из таких инноваций – автоматизированная система коммерческого осмотра поездов и вагонов, известная так же как «электронные ворота» (далее – АСКО ПВ) – устройство автоматического выявления коммерческого брака в поездах и вагонах [7]. Она необходима для качественного осмотра поездов, вагонов и контейнеров на предмет сохранности перевозимых грузов, правильности их загрузки, исправности вагонов, выявления негабаритности, т. е. обеспечивает безопасность перевозки в целом.

Первые системы АСКО ПВ были разработаны в 1995 г. Они совершенствовались и модернизировались, расширялся спектр их функциональных возможностей.

В настоящее время «АСКО ПВ представляет собой комплекс устройств, предназначенных для визуального контроля и регистрации состояния вагонов и грузов поездов в процес-

се движения, визуального контроля качества крепления грузов, контроля соблюдения габаритности погрузки, улучшения условий труда и повышения уровня личной безопасности работников, занятых осмотром вагонов» [8, с. 126].

В состав системы входят:

- электронные габаритные ворота;
- тепловизионный комплекс;
- вагонные весы для взвешивания в движении;
- автоматизированное рабочее место оператора (АРМ О ПКО);
- автоматизированное рабочее место приемосдатчика (АРМ ПКО) в составе Единой автоматизированной системы актово-претензионной работы хозяйства коммерческой работы в сфере грузовых перевозок (ЕАСАПР М);
- комплект оборудования подсистемы электронных габаритных ворот;
- комплект оборудования телевизионной подсистемы видеоконтроля;
- комплект оборудования для передачи сигналов;
- комплект оборудования подсистемы освещения;
- комплект оборудования подсистемы оповещения [9].

АСКО ПВ применяется на железнодорожных грузовых, участковых, сортировочных и пограничных станциях, а также в пунктах передачи вагонов. Данная система обеспечивает круглосуточный контроль в течение движения поезда за негабаритностью вагонов подвижного состава, визуальный контроль их технического состояния. Она оборудована световой и звуковой индикацией на срабатывания каждого из датчиков. Система также учитывает порядковый номер вагона в составе поезда. Помимо этого, электронные ворота принимают во внимание состояние собственных датчиков и имеет связь с АРМ О ПКО.

Схема работы АСКО ПВ показана на рис. 1. Рассматриваемая система представляет собой электронные ворота, которые устанавливаются на железнодорожной станции. Они оснащены телекамерами, датчиками контроля негабарит-

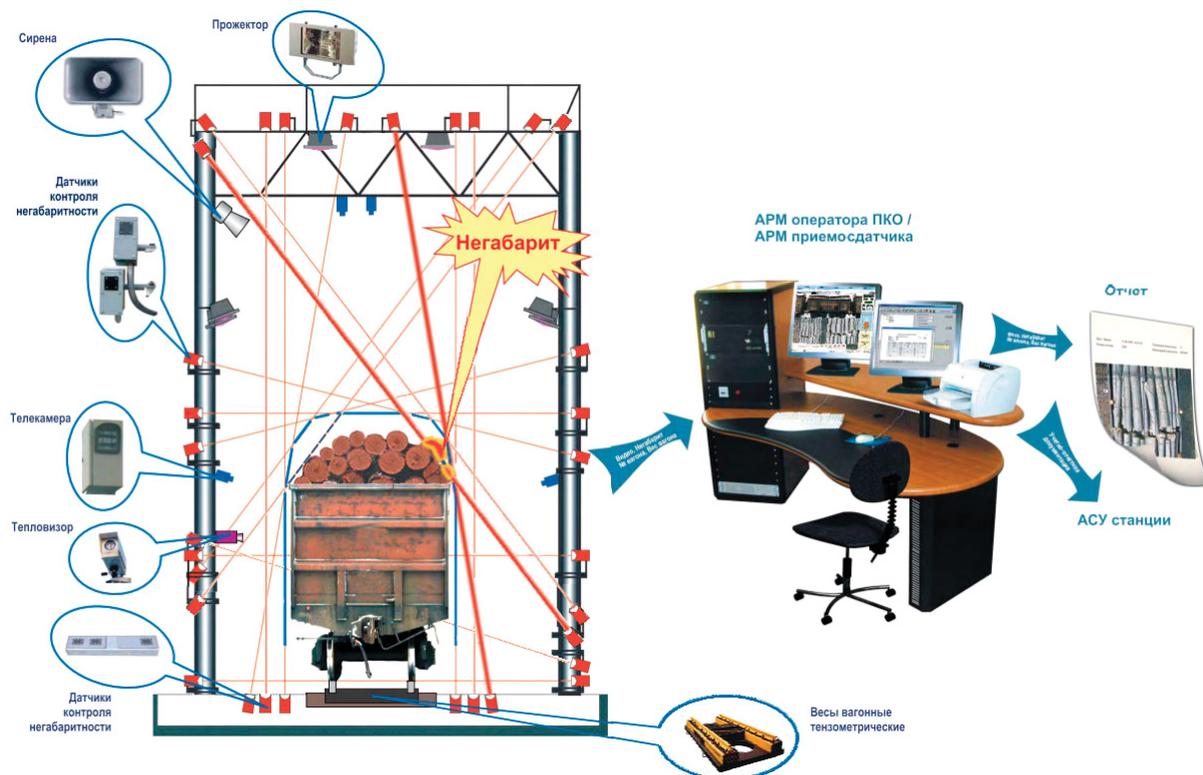


Рис. 1. Схема работы автоматизированной системы коммерческого осмотра поездов и вагонов (АСКО ПВ)

ности и тепловизорами. Через них на скорости до 60 км/ч проходят поезда [10]. Изображение и данные приборов автоматически передаются оператору пункта коммерческого осмотра, который обрабатывает их на компьютере и затем с возможными выявленными замечаниями передает приемщику. При обнаружении неисправностей или негабаритности вагон отцепляют. Система обеспечивает автоматический контроль габаритов погрузки по девяти зонам, основного габарита погрузки по двум зонам и максимального по ширине габарита подвижного состава по двум зонам. Также система позволяет учитывать массу проходящего вагона, что исключает пропуск груженых вагонов с перегрузом.

На данный момент самой оснащенной системами АСКО ПВ в России является станция Лужская-Сортировочная Октябрьской железной дороги (рис. 2). В 2015 г. на ней было установлено восемь автоматизированных систем коммерческого осмотра поездов и ваго-

нов АСКО ПВ [11]. Для использования систем АСКО ПВ на станции Лужская-Сортировочная потребовались как стандартный комплекс мероприятий по введению новой технологии в эксплуатацию, так и ряд оригинальных инженерных решений. Так, необходимой стала установка промышленного модуля на соседних путях с целью удобного размещения передатчиков для пяти систем, расположенных в небольшом отдалении друг от друга. Данный промышленный модуль включает в себя передающие и силовые шкафы, стол-верстак, пожарную и охранную сигнализацию, систему кондиционирования.

Установка подобного промышленного модуля, хотя и требует дополнительных затрат, в дальнейшем сможет их окупить. Ведь данное инженерное решение значительно упрощает техническое обслуживание автоматических систем, а также повышает срок эксплуатации передатчиков. Также стоит отметить, что введение в эксплуатацию систем АСКО ПВ на



Рис. 2. Система АСКО ПВ на железнодорожной станции Лужская-Сортировочная Октябрьской железной дороги

станции Лужская-Сортировочная потребовало весьма незначительного промежутка времени, обычно значительного для установки подобного рода систем, учитывая их количество. Так, весь объем работ по установке восьми автоматических систем, включавший в себя производство оборудования, его монтаж, пуско-наладочные работы, а также непосредственный ввод в эксплуатацию, занял всего лишь четыре месяца.

Помимо стандартной системы АСКО ПВ есть также система АСКО ПВ 3D – новая автоматизированная система коммерческого осмотра поездов и вагонов, разработанная с использованием технологии лазерного сканирования.

Функциональные параметры этой системы позволяют обеспечить:

- оперативное и качественное обнаружение коммерческих неисправностей подвижного состава на основе анализа результатов лазерного сканирования;
- регистрацию и воспроизведение данных сканирования в режиме реального времени;

- точную локализацию выявленных неисправностей и их визуализацию на 3D модели вагонов;

- видеозапись составов и формирование видеоархива;

- создание отчетно-учетных документов с возможностью их печати, передачи по электронной почте и экспорта в файл.

Сравнение технических характеристик систем АСКО ПВ и АСКО ПВ 3D представлено в таблице [12]. И старая, и новая системы обеспечивают круглосуточный контроль за проходящими составами в одинаковом разрешении (1280×960), используя по 4 камеры визуального наблюдения с одинаковой скоростью записи. Так как в основе обеих систем лежат идентичные конструкторские решения, то характеристики, касающиеся прохождения через электронные ворота вагонов, также идентичны. Однако АСКО ПВ применяет ИК-датчики для подсчета количества вагонов в отличие от АСКО ПВ 3D, использующей индукционные педали. Другие показатели, в том числе срок службы и диапазон рабочих температур, не

## Сравнение технических характеристик систем АСКО ПВ и АСКО ПВ 3D

Наименование параметров	АСКО ПВ	АСКО ПВ 3D
1	2	3
Режим работы	Круглосуточный	
Количество телекамер визуального контроля	4	
Разрешение изображения, пикселей	1280×960	
Скорость записи/воспроизведения видеоизображения, кадров/с на канал	25	
Допустимая скорость движения состава в контролируемой зоне, км/ч	60	
Режим движения состава	Непрерывное и реверсивное с остановками	
Тип датчиков подсистемы счета вагонов	ИК-датчики	Индукционные педали
Число контрольных зон габарита погрузки	9	
Число контрольных зон основного габарита погрузки	2	
Число контрольных зон максимального по ширине габарита подвижного состава	2	
Тип прожекторов подсистемы освещения	Металлогалогенные лампы	Светодиодные лампы
Срок службы, не менее	10 лет	
Визуализация данных на 3D-модели	Нет	Есть

отличаются. Основным конкурентным преимуществом системы нового образца является визуализация данных на 3D-модели вагона, что позволяет точно локализовать выявленные неисправности.

Итак, внедрение систем коммерческого осмотра поездов и вагонов АСКО ПВ имеет большое количество преимуществ:

- улучшает качество осмотра подвижного состава, вагонов и грузов;
- сокращает время осмотра;
- увеличивает пропускную способность станции, как следствие повышается прибыль железной дороги;
- растет конкурентоспособность предприятий, использующих АСКО ПВ;
- своевременно выявляет коммерческие неисправности, создающие угрозу безопасности движения поездов;

- улучшает показатели сохранности перевозимых грузов;

- обеспечивает соблюдение принципов охраны труда;

- уменьшает травматизм среди работников, задействованных на пунктах коммерческого осмотра поездов и вагонов, за счет выведения сотрудников из опасной зоны;

- информация более систематизирована;
- создает более комфортные условия труда.

Однако системы АСКО ПВ не так легко ввести в эксплуатацию на станциях, так как существуют некоторые сложности:

1. Высокая стоимость. Ориентировочная стоимость одной автоматизированной системы АСКО ПВ с установкой – 8 млн руб. [13].

2. Не на всех станциях есть техническая возможность установки ворот. Для установки

несущей конструкции должен быть обеспечен ряд условий. Подробно они описаны в тексте патента «Автоматизированная система коммерческого осмотра поездов и вагонов (АСКО ПВ)». Некоторые из них:

«– расстояние от несущей конструкции до ближайшего стрелочного перевода должно быть не менее 30 м (с обеих сторон);

– ось каждой из вертикальных опор должна находиться на расстоянии не менее чем 3800 мм от продольной оси пути;

– высота от уровня головки рельса до нижнего пояса перекладины не менее 9400 мм;

– расстояние между осями смежных путей (ширина междупутья) в месте установки опор несущей конструкции системы не должно быть менее 5300 мм;

– не допускается размещение несущей конструкции системы в кривых участках пути;

– несущая конструкция системы в месте ее размещения на станции и напольное оборудование системы не должны ограничивать установленные правилами технической эксплуатации железных дорог (ПТЭ) скорости движения поездов и не вызывать осложнений в поездной и маневровой работе станции;

– по обе стороны от несущей конструкции системы отрезки пути длиной по 50 мм должны быть прямыми и горизонтальными, с допускаемым превышением уровней верха головок рельсов контролируемого пути друг над другом в пределах не более 15 мм» [14].

3. Требуется временные и финансовые ресурсы для обучения персонала станций.

Над первым и третьим пунктами активно работает ОАО «РЖД». Компания уделяет значительное внимание инновациям [15].

Также большое значение придается вопросам подготовки и обучения кадров. Это в своем докладе на заседании правления отметил генеральный директор, председатель правления ОАО «РЖД» Олег Белозёров: «В 2018-м прошли профессиональную подготовку, переподготовку и получили вторую профессию более 44 тыс. рабочих, повысили квалификацию около 149 тыс. рабочих и более 130 тыс. руководителей и специалистов. Дистанционное

обучение и оценка, мастер-классы, управленческие игры стали нормой и правилом обучения и подготовки всех категорий работников ОАО «РЖД». <...> Люди – наш самый ценный капитал, накопленный за всю историю российских железных дорог, они вместе со всей страной всегда успешно решали сложные задачи» [16].

Таким образом, повсеместное внедрение новых информационных технологий на железнодорожном транспорте, в том числе автоматизированных систем (АСКО ПВ и АСКО ПВ 3D), позволит совершить транспортным компаниям качественный скачок в развитии. Ведь эти системы не только обеспечивают безопасные условия труда для рабочих данной сферы, переводя процесс коммерческого осмотра вагонов состава в полностью дистанционную форму, но и значительно улучшают качество осмотра ввиду использования ряда датчиков и приборов. Автоматизация процесса также приведет к сокращению времени на проведение осмотра. В результате будут своевременно выявляться возможные технические неисправности вагонов, что улучшит качество как безопасности транспортировки, так и сохранности перевозимых грузов. Более того, электронные ворота значительно сократят время нахождения составов на сортировочных станциях, что позволит увеличить скорость вагонопотоков. Внедрение таких инновационных технологий на некоторых станциях уже доказало свою высокую эффективность, что дает основание рекомендовать их для применения на железнодорожных станциях России.

### Библиографический список

1. Сайт ОАО «РЖД» – РЖД в цифрах. – URL : [http://www.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE\\_ID=5232#cargo](http://www.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=5232#cargo) (дата обращения : 13.12.2018).

2. GUDOK.RU. Комплексная программа инновационного развития ОАО «РЖД» до 2020 года. – Утв. правлением компании. – URL : <http://www.gudok.ru/news/?ID=1332475> (дата обращения : 11.12.2018).

3. Сайт компании ООО «2050». – URL : [http://2050-integrator.com/news/innotrans\\_2018](http://2050-integrator.com/news/innotrans_2018) (дата обращения : 13.12.2018).

4. Цифровая железная дорога : настоящее и будущее // Гудок. – 2016. – Вып. 152 (26057).

5. Future of rail 2050. ARUP 2015.

6. Куприяновский В. П. Цифровая железная дорога – прогнозы, инновации, проекты / В. П. Куприяновский, Г. В. Суконников, П. М. Бубнов, С. А. Синягов, Д. Е. Намиот // International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – Vol. 4, N 9. – P. 34–43.

7. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. – М. : МПС РФ, 2000. – П. 6.39.

8. Карпухина М. А. Современные системы коммерческого осмотра вагонов / М. А. Карпухина, Д. И. Селиверов // Технические науки в России и за рубежом : материалы II Междунар. науч. конференции (г. Москва, ноябрь 2012 г.). – М. : Буки-Веди, 2012. – С. 125–127.

9. Сайт АО «АЛЬФА-ПРИБОР». Автоматизированные системы осмотра. – URL : <http://www.alfa-pribor.ru/products/automated-inspection-system/asko-pv> (дата обращения : 13.12.2018).

10. Сайт АО «АЛЬФА-ПРИБОР». Продукция. – URL : <http://www.alfa-pribor.ru/products/automated-inspection-system> (дата обращения : 13.12.2018).

11. Сайт «НПК “АВТОМАТИЗАЦИЯ”». – URL : <http://pkavt.ru/portfolio/asko-pv> (дата обращения : 13.12.2018).

12. Сайт АО «АЛЬФА-ПРИБОР». Описание системы автоматизированных систем осмотра. – URL : <http://www.alfa-pribor.ru/products/automated-inspection-system/asko-pv-3d> (дата обращения : 13.12.2018).

13. РОСБАЛТ. «РЖД внедряет современную систему досмотра грузовых поездов». Статья от 10.01.2007 г. – URL : <http://www.rosbalt.ru/main/2007/01/10/281524.html> (дата обращения : 13.12.2018).

14. Цыпин Н. З. Автоматизированная система коммерческого осмотра поездов и вагонов (АСКО ПВ) : Патент № 2252170 Российская Федерация / Н. З. Цыпин, В. М. Лысый, В. Б. Дегтярь. – М., 2006. – Бюл. № 14.

15. Офиц. сайт ОАО «РЖД». Инновационные системы. – URL : <http://www.rzd.ru/static/>

[public/ru?STRUCTURE\\_ID=666&layer\\_id=3290&refererLayerId=3290&id=4080](http://www.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=666&layer_id=3290&refererLayerId=3290&id=4080) (дата обращения : 13.12.2018).

16. GUDOK.RU. «Год больших достижений». – URL : [http://www.gudok.ru/first\\_person/?ID=1446194](http://www.gudok.ru/first_person/?ID=1446194) (дата обращения : 13.12.2018).

## References

1. RZhD v tsifrakh [Russian Railways JSC official website. Russian Railways in numbers]. URL: [http://www.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE\\_ID=5232#cargo](http://www.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=5232#cargo) (accessed: 13.12.2018). (In Russian)

2. Kompleksnaia programma innovatsionnogo razvitiia OAO RZhD do 2020 goda utverzhdena pravleniem kompanii [Russian Railways JSC board has approved an integrated programme for the company's innovative development through to 2020]. URL: <http://www.gudok.ru/news/?ID=1332475> (accessed: 11.12.2018). (In Russian)

3. Sait OOO “2050” [2050 JSC website]. URL: [http://2050-integrator.com/news/innotrans\\_2018](http://2050-integrator.com/news/innotrans_2018) (accessed: 13.12.2018). (In Russian)

4. Tsifrovaia zheleznaia doroga: nastoiashchee i budushchee [Digital railway: present and future]. Gudok, 2016, issue 152 (26057). (In Russian)

5. Future of rail 2050. ARUP 2015.

6. Kupriianovskii V. P., Sukonnikov G. V., Bubnov P. M., Siniagov S. A. & Namiot D. Tsifrovaia zheleznaia doroga – prognozy, innovatsii, proekty [Digital railway – forecasts, innovations, projects]. International Journal of Open Information Technologies, 2016, vol. 4, no. 9, pp. 34–43. (In Russian)

7. Pravila tekhnicheskoi ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossiiskoi Federatsii. Punkt 6.39 [Regulations for technical operation of Russian Federation's railways. Section 6.39]. Moscow, Russian Federation Ministry for Ways of Communication Publ., 2000. (In Russian)

8. Karpukhina M. A. & Seliverov D. I. Sovremennye sistemy kommercheskogo osmotra vagonov [Modern systems for carriage commercial inspection]. Tekhnicheskie nauki v Rossi i za rubezhom. Materiali II Mezhd. nauch. konferensii [Engineering sciences in Russia and abroad. Coll. Papers of the 2<sup>nd</sup> Intern. Sci.

*Conference. Moscow, Nov. 2012*]. Moscow, Buki-Vedi Publ., 2012, pp. 125–127. (In Russian)

9. *Avtomatizirovannye sistemy osmotra* [*Al'fa-pribor SC website. Automatic inspection systems*]. URL: <http://www.alfa-pribor.ru/products/automated-inspection-system/asko-pv/> (accessed: 13.12.2018). (In Russian)

10. *Produksiia* [*Al'fa-pribor SC website. Products*]. URL: <http://www.alfa-pribor.ru/products/automated-inspection-system/> (accessed: 13.12.2018). (In Russian)

11. *Sait NPK "Avtomatizatsiia"* [*Design and production corporation Avtomatizatsiia website*]. URL: <http://pkavt.ru/portfolio/asko-pv/> (accessed: 13.12.2018). (In Russian)

12. *Opisanie sistemy avtomatizirovannykh sistem dosmotra* [*Al'fa-pribor SC website. Description of a system of automatic inspection systems*]. URL: <http://www.alfa-pribor.ru/products/automated-inspection-system/asko-pv-3d/> (accessed: 13.12.2018). (In Russian)

13. RZhD vnedriaet sovremennuiu sistemu dosmotra gruzovykh poezdov [Russian Railways introduce a modern system for inspection of cargo trains]. *Rosbalt news agency*. URL: <http://www.rosbalt.ru/main/2007/01/10/281524.html> (accessed: 13.12.2018). (In Russian)

14. Tsypin N. Z., Lysyi V. M., Degtiar' V. B. et al. *Avtomatizirovannaia sistema kommercheskogo osmotra poezdov i vagonov (ASKO PV)* [Automatic system for commercial inspection of trains and carriages (ASKO PV)]. Patent no. 2252170 Russian Federation. Moscow, 2006, bull. no. 14. (In Russian)

15. *Innovatsionnye sistemy* [*Russian Railways JSC official website. Innovative systems*]. URL: [http://www.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE\\_ID=666&layer\\_id=3290&refererLayerId=3290&id=4080](http://www.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=666&layer_id=3290&refererLayerId=3290&id=4080) (accessed: 13.12.2018). (In Russian)

16. *God bol'shikh dostizhenii* [Year of major achievements]. URL: [http://www.gudok.ru/first\\_person/?ID=1446194](http://www.gudok.ru/first_person/?ID=1446194) (accessed: 13.12.2018). (In Russian)

ТОНКОВА Мария Леонидовна – аспирант, [marie.tonkova@gmail.com](mailto:marie.tonkova@gmail.com) (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 536.12621.016.4

**В. Н. Фоменко, М. А. Шварц****ДИНАМИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА  
СТВОЛА ШАХТНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ МЕТРОПОЛИТЕНА**

Дата поступления: 26.11.2018

Решение о публикации: 01.12.2018

**Аннотация**

**Цель:** Расчет динамического распределения температуры в грунте вблизи ствола шахтной вентиляции метрополитена (далее – ствол). **Методы:** В основу расчетов положена модель, в которой ствол рассматривается как система двух вложенных друг в друга полых коаксиальных цилиндров длиной 60 м. Внутренний цилиндр заполнен бетоном. Внешний цилиндр моделирует ближнее окружение ствола и наполнен влажным грунтом (грязью). Систему цилиндров окружает цилиндрический блок грунта высотой и радиусом 400 м. Используются методы математического анализа и линейной алгебры, численные методы решения уравнений в частных производных, метод конечных разностей. **Результаты:** Разработан и применен к модели ствола разностный метод решения временного уравнения теплопроводности. Для случая кусочно-экспоненциальных граничных условий построен оператор эволюции, не зависящий от начальных и граничных условий и позволяющий быстро проводить новый расчет при их изменении. Исследованы спектральные свойства оператора эволюции. Предложена аппроксимация температуры на ограниченном временном интервале. Рассчитана температура в грязевом слое грунта для 12 предыдущих зимних периодов (2005–2017 гг.) при трех значениях удельной теплопроводности бетона: 0,17 и 0,10 Вт/(м·К) (для теплоизоляционного вида бетона); 2,04 Вт/(м·К) (для обычного бетона). Показано, что для первого вида бетона имели место незначительные (до  $-1,6$  °С) замерзания влажного грунта, для второго замерзаний не было вовсе. В то же время последний тип бетона часто и глубоко (до  $-20$  °С) промерзает. **Практическая значимость:** Полученные результаты позволяют оценить риск повреждения конструкции ствола из-за замерзания влажного грязевого слоя, окружающего его. Вывод из проведенных расчетов: применение теплоизоляционного бетона весьма существенно уменьшает риск аварий вследствие промерзания влажного грунта вблизи ствола.

**Ключевые слова:** Тепловой поток, оператор эволюции, спектр оператора, полый цилиндр, ствол шахтной вентиляции, метрополитен, замерзание грунта.

\***Viktor N. Fomenko**, D. Phys. and Math. Sci., professor, vfomenko1943@gmail.com; **Mikhail A. Shvarts**, Cand. Eng. Sci., associate professor, shvarts4545@mail.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) DYNAMIC DESCRIPTION OF THE TEMPERATURE REGIME OF THE STEM OF MINE VENTILATION OF METROPOLITEN. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-1-139-148

**Summary**

**Objective:** Determination of dynamic temperature distribution inside the ground near the underground railway ventilation shaft (shaft further on). Calculations are performed within a model where the shaft is treated as system of two co-axial hollow cylinders of a length of 60 m embedded into each other. The inner cylinder is filled by concrete. The outer cylinder simulates the shaft's vicinity and it is filled by wet ground (sludge). The cylinders are surrounded by a ground block with a height and radius of 400 m. **Methods:** Methods of mathematical analysis and linear algebra, numerical methods of solving partial differential equations, finite-difference methods. **Results:** A finite-difference approach to solving the time-dependent heat-transfer equation has been developed and applied to the shaft model. An evolution

operator has been constructed for the case of piecewise-exponential boundary conditions. It does not depend on initial and boundary conditions and enables one to easily recalculate data when the conditions changed. The spectral properties of the evolution operator are explored. An approximation of temperature on restricted time interval is suggested. The temperature in the wet ground layer has been computed for 12 preceding winter times (2005–2017) for three values of concrete heat conduction coefficients: 0,17 W/(m·K), 0,10 W/(m·K) (both values relate to heat insulating concrete), 2,04 W/(m·K) (ordinary concrete). It is shown that merely slight freezing of wet ground (down to  $-1,6$  °C) would have occurred several times for the first kind of concrete whereas no freezing at all would have taken place for the second concrete sort. In contrast to this strong freezing (down to  $-20$  °C) happened many times for the last sort of concrete. **Practical importance:** The results obtained allow estimation of risk of a shaft damage caused by freezing of surrounding sludge layer. Conclusion drawn is that using heat insulating concrete essentially diminishes risk of hazard provoked by wet ground freezing near the shaft.

**Keywords:** Heat flux, evolution operator, operator spectrum, hollow cylinder, ventilation shaft, underground railway, ground freezing.

## Введение

При конструировании вентиляционных шахт ответственных объектов, например метрополитенов, для обеспечения их надежной долговременной работы, особенно в зимний период, важно учитывать изменения температуры по всей глубине шахтного ствола на границе его обделки и окружающего грунта. При колебаниях температуры от положительных значений воздуха в стволе до низких отрицательных ( $-20$  °C и ниже) может происходить промерзание обводненного грунта вокруг обделки на разных глубинах. Это оказывает деформационное воздействие на конструкцию ствола и иногда приводит к его разрушению, что вызывает возникновение аварийной ситуации. Информация об изменении теплового потока по глубине границы грунт–ствол позволяет совершенствовать материал конструкции ствола, улучшать его теплоизоляционные свойства.

Ранее стационарный тепловой процесс для моделей шахтной вентиляции рассматривался в [1, 2]. В настоящей статье исследуется динамическое распределение температуры грунта вблизи ствола шахтной вентиляции метрополитена. Вследствие инерционности и кумулятивности тепловых процессов динамика является важным фактором при принятии обоснованного решения о степени защищен-

ности конструкции ствола от механических повреждений во время морозов.

## Расчетная схема

Стенка ствола обменивается теплом с атмосферным воздухом, поступающим внутрь, и с окружающим ствол слоем влажного грунта. Поверхность грунта также находится в тепловом контакте с воздухом.

На рис. 1 представлена модель ствола шахтной вентиляции метрополитена, положенная в основу расчетов данной работы. Отметим, что для сохранения наглядности масштаб на рисунке не соблюдается.

Эта модель является упрощением реального объекта по следующим причинам:

- 1) предполагается симметрия распределения температуры относительно оси ствола (ось  $Z$  на рис. 1). Это упрощение не представляется существенным искажением реальности;
- 2) стенка ствола рассматривается как слой бетона и игнорируется входящая в ее состав чугунная обделка, наличие которой не может существенно влиять на температуру вне ствола из-за высокой теплопроводности чугуна;
- 3) на торцах ствола предполагается теплоизоляция (на рис. 1 она изображена сплошными толстыми линиями). Геометрия и процессы теплообмена на концах ствола сложны.

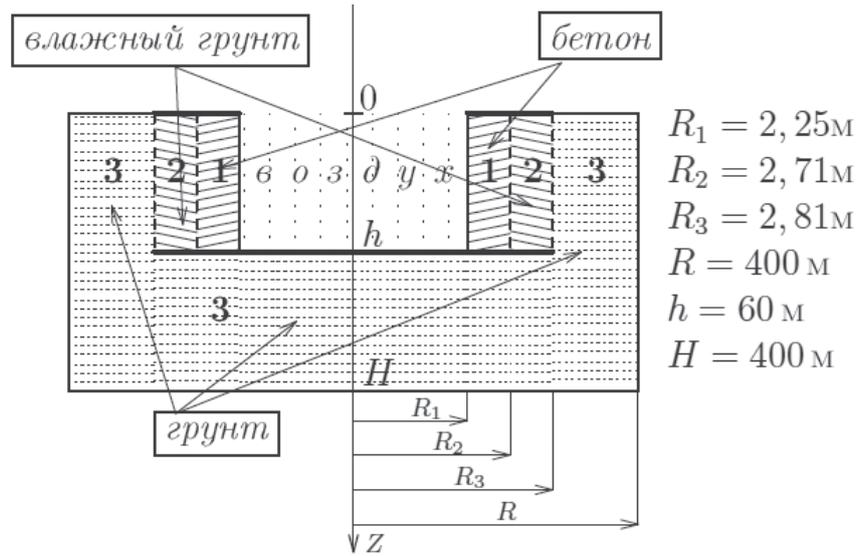


Рис. 1. Модель ствола шахтной вентиляции:

$R$  – радиусы цилиндров;  $h$  – глубина ствола;  $H$  – нижняя граница грунтового цилиндра

Однако они не могут существенно влиять на температуру в области, достаточно удаленной от его торцов. Именно эта область и представляет наибольший практический интерес.

Пусть  $T(\mathbf{r}, t)$  – температура в данной точке, вектор  $\mathbf{r}$  – радиус-вектор точки,  $t$  – время. Тогда  $T(\mathbf{r}, t)$  удовлетворяет системе

$$\begin{cases} \operatorname{div}(\lambda(\mathbf{r})\nabla T(\mathbf{r}, t)) = c(\mathbf{r})d(\mathbf{r})\frac{\partial T(\mathbf{r}, t)}{\partial t}, \\ T(\mathbf{r}, t) = T_b(\mathbf{r}, t)|_{\mathbf{r} \in \Gamma_1}, \\ \left. \frac{\partial T(\mathbf{r}, t)}{\partial n} \right|_{\mathbf{r} \in \Gamma_2} = 0, \\ T(\mathbf{r}, t_0) = T_{in}(\mathbf{r}), \end{cases} \quad (1)$$

в которой  $\lambda(\mathbf{r})$ ,  $c(\mathbf{r})$ ,  $d(\mathbf{r})$  – коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность соответственно;  $\Gamma_1$  – участок границы, где задана температура  $T_b(\mathbf{r}, t)$  (на рис. 1 тонкие сплошные линии);  $\Gamma_2$  – участок теплоизоляции (на рис. 1 жирные сплошные линии);  $T_{in}(\mathbf{r})$  задает температуру в момент времени  $t_0$ . Отметим, что функции  $\lambda(\mathbf{r})$ ,  $c(\mathbf{r})$ ,  $d(\mathbf{r})$  кусочно-постоянны: они принимают фиксированные значения внутри областей 1, 2, 3 (см. рис. 1).

Дифференциальное уравнение (1) описывает «тепловой баланс» [3, 4], что эквивалент-

но следующему утверждению: для любой замкнутой области  $V$  с границей  $S$  исходящий тепловой поток равен количеству тепла, освобождающегося в единицу времени от остывания тела внутри  $V$ :

$$\begin{aligned} -\int_V c(\mathbf{r})d(\mathbf{r})\frac{\partial T(\mathbf{r}, t)}{\partial t}dV &= \int_S \mathbf{J}(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{n}(\mathbf{r})dS, \\ \mathbf{J}(\mathbf{r}) &= -\lambda(\mathbf{r})\nabla T(\mathbf{r}, t), \end{aligned} \quad (2)$$

здесь  $\mathbf{n}(\mathbf{r})$  – внешняя нормаль к поверхности  $S$ ;  $\mathbf{J}(\mathbf{r})$  – плотность теплового потока.

Для нахождения приближенного решения задачи (1) область  $\{0 \leq z \leq H; 0 \leq r \leq R\}$  разбивается на ячейки [5–8]: систему концентрических колец

$$G_{ik} = \left\{ \begin{aligned} r_i - \frac{1}{2}\Delta r_i \leq r \leq r_i + \frac{1}{2}\Delta r_i, \\ z_k - \frac{1}{2}\Delta z_k \leq z \leq z_k + \frac{1}{2}\Delta z_k \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

Отрезок  $[0, R]$  разбивается на четыре сегмента точками  $R_1, R_2, R_3$ , каждый из которых равномерно делится на  $n_r^{(j)}$  ( $j = 1, \dots, 4$ ) частей. Аналогично отрезок  $[0, H]$  разбивается на три сегмента  $[0, h_0], [h_0, h], [h, H]$ , и каждый из них

равномерно делится на  $n_z^{(j)}$  ( $j = 1, 2, 3$ ) частей,  $h_0$  – эффективная глубина промерзания грунта (подробнее она обсуждается ниже). Внутри каждой ячейки коэффициент теплопроводности  $\lambda(\mathbf{r})$ , удельная теплоемкость  $c(\mathbf{r})$  и плотность  $d(\mathbf{r})$  постоянны.

Будем считать, что ячейки  $G_{ik}$  (см. систему (3)) имеют настолько малую ширину  $\Delta r_i$  и высоту  $\Delta z_k$ , что внутри них температура может быть достаточно точно представлена квадратичной функцией по каждой координате:

$$T_{ik}(r, z, t) = \theta_{ik}(t) + \alpha_{ik}(t)(r - r_i) + \beta_{ik}(t)(r - r_i)^2 + \eta_{ik}(t)(z - z_k) + \zeta_{ik}(t)(z - z_k)^2 \quad (4)$$

( $\theta_{ik}(t)$  – температура в центре ячейки), величины  $\alpha_{ik}(t)$  и  $\beta_{ik}(t)$  определяются следующим образом. Если  $G_{ik}$  не является ячейкой на границе области постоянства  $\lambda$ , то зависимость по  $r$  распространяется на две соседние ячейки и решается следующая система (для упрощения обозначений опускаем зависимость от времени):

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{ik} \left( \frac{1}{2} \Delta r_i + \frac{1}{2} \Delta r_{i+1} \right) + \beta_{ik} \left( \frac{1}{2} \Delta r_i + \frac{1}{2} \Delta r_{i+1} \right)^2 = \theta_{i+1,k} - \theta_{i,k}, \\ \alpha_{ik} \left( -\frac{1}{2} \Delta r_i - \frac{1}{2} \Delta r_{i-1} \right) + \beta_{ik} \left( \frac{1}{2} \Delta r_i + \frac{1}{2} \Delta r_{i-1} \right)^2 = \theta_{i-1,k} - \theta_{i,k}. \end{array} \right. \quad (5)$$

Пусть  $G_{ik}$  – граничная ячейка. Учитывая, что  $\lambda$  может изменяться только в радиальном направлении, рассматриваем в этом случае четыре ячейки:  $G_{i-1,k}$  и  $G_{i,k}$  с  $\lambda = \lambda_1$  и  $G_{i+1,k}$  и  $G_{i+2,k}$  с  $\lambda = \lambda_2$ . Для первой и второй пар ячеек принимается разная зависимость от  $r$ . Вместо (5) приходим к системе

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{ik} \left( -\frac{1}{2} \Delta r_i - \frac{1}{2} \Delta r_{i-1} \right) + \beta_{ik} \left( \frac{1}{2} \Delta r_i + \frac{1}{2} \Delta r_{i-1} \right)^2 = \theta_{i-1,k} - \theta_{i,k}, \\ \alpha_{i+1,k} \left( \frac{1}{2} \Delta r_{i+1} + \frac{1}{2} \Delta r_{i+2} \right) + \beta_{i+1,k} \left( \frac{1}{2} \Delta r_{i+1} + \frac{1}{2} \Delta r_{i+2} \right)^2 = \theta_{i+2,k} - \theta_{i+1,k}, \\ \alpha_{ik} \frac{1}{2} \Delta r_i + \beta_{ik} \left( \frac{1}{2} \Delta r_i \right)^2 + \alpha_{i+1,k} \frac{1}{2} \Delta r_{i+1} - \beta_{i+1,k} \left( \frac{1}{2} \Delta r_{i+1} \right)^2 = \theta_{i+1,k} - \theta_{i,k}, \\ \lambda_1(\alpha_{ik} + \beta_{ik} \Delta r_i) - \lambda_2(\alpha_{i+1,k} - \beta_{i+1,k} \Delta r_{i+1}) = 0. \end{array} \right. \quad (6)$$

В системе (6) два последних уравнения обеспечивают сопряжение температур и тепловых потоков на границе пар ячеек при  $r = r_i + \frac{1}{2} \Delta r_i = r_{i+1} - \frac{1}{2} \Delta r_{i+1}$ . Параметры  $\eta_{ik}(t)$  и  $\zeta_{ik}(t)$  определяются аналогично  $\alpha_{ik}(t)$  и  $\beta_{ik}(t)$ .

Отметим, что принятый нами второй порядок зависимости температуры от  $r$  и  $z$  внутри ячейки минимально допустимый. Как видно из уравнения (2), критическим для определения динамики является выходной поток, который складывается из разностей близких величин – потоков на противоположных гранях ячейки. В линейном же приближении плотность теплового потока постоянна, и выходной поток по оси  $z$  равен нулю, а по радиальному направлению отличается от нуля только за счет геометрического фактора. Однако имеются особые случаи, когда конкуренция потоков на противоположных гранях отсутствует. Это относится к ячейкам, примыкающим к оси  $z$  и/или к теплоизолирующим слоям. Для таких ячеек по соответствующей переменной используем линейное приближение. В разложение (4) не включен квадратичный член  $\sim (r - r_i)(z - z_k)$ , так как он не изменяет входящий тепловой поток ячейки.

Пронумеруем последовательно пары индексов, задающих рабочие ячейки (все ячейки, кроме лежащих внутри ствола), числами, образующими множество  $\Omega$ . Пусть  $\Gamma$  – подмножество номеров для граничных ячеек, а  $\Xi$  содержит номера внутренних ячеек, т. е. ячеек, для которых требуется вычислить температуру. Далее  $U(L)$  обозначим множество номеров рабочих ячеек, соседних с ячейкой  $L$ . Если  $[i, k] \equiv L$ , то  $r_L \equiv r_i$  и  $z_L \equiv z_k$ , иными словами, большей нижней индекс относится к ячейке. Будем использовать аналогичные обозначения и для других переменных.

Применяя соотношение (2) к ячейке  $G_L$ , получаем

$$2\pi r_L \Delta r_L \Delta z_L c_L d_L \frac{\partial \theta_L}{\partial t} = 2\pi \lambda_L \Delta r_L \Delta z_L (\alpha_L + 2r_L (\beta_L + \zeta_L)), \quad (7)$$

где в левой части учтен только ведущий член  $\theta_L$ .

После подстановки в уравнение (7) решений системы (5) или (6) приходим к уравнению

$$\frac{\partial \mathbf{T}(t)}{\partial t} = \mathbf{A} \cdot \tilde{\mathbf{T}}(t), \quad (8)$$

где

$$\mathbf{T}(t) = \begin{pmatrix} \theta_1(t) \\ \theta_2(t) \\ \vdots \\ \theta_M(t) \end{pmatrix}; \quad \tilde{\mathbf{T}}(t) = \begin{pmatrix} \theta_1(t) \\ \theta_2(t) \\ \vdots \\ \theta_N(t) \end{pmatrix};$$

$M$  – число внутренних ячеек;  $N$  – число рабочих ячеек. Было принято правило, что внутренние ячейки получают первые номера из всех рабочих ячеек. Матрица  $\mathbf{A}$  обладает свойством

$$\sum_{k=1}^N A_{qk} = 0, \quad q = 1, \dots, M. \quad (9)$$

Свойство (9) означает, что правая часть уравнения (8) не зависит от начала отсчета тем-

пературы, так же как от него не зависят тепловые потоки. Мы не приводим здесь элементы матрицы  $\mathbf{A}$  в явном виде для экономии места.

Пусть  $\Delta t$  достаточно малый временной шаг. Делая в (8) замену

$$\frac{\partial \theta_L(t)}{\partial t} \Rightarrow \frac{\theta_L(t + \Delta t) - \theta_L(t)}{\Delta t},$$

получаем уравнение эволюции для вектора термического состояния

$$\mathbf{T}(t + \Delta t) = \mathbf{T}(t) + \mathbf{A} \cdot \tilde{\mathbf{T}}(t) \cdot \Delta t. \quad (10)$$

Уравнение (10) следует дополнить начальными и граничными условиями

$$L \in \Omega; \quad \theta_L(t_0) = T_{ini}(r_L, z_L), \\ L \in \Gamma; \quad \theta_L(t) = T_b(r_L, z_L, t).$$

Отметим, что «температурным представителем» ячейки  $L$  условно считаем параметр  $\theta_L$ , т. е. температуру на окружности ( $r = r_L$ ;  $z = z_L$ ).

Интересно рассмотреть частный случай граничных условий вида

$$L \in \Gamma; \quad \theta_L(t) = B_L \exp(\gamma_L t).$$

Нетрудно проверить, что в пределе  $\Delta t \rightarrow 0$

$$\tilde{\mathbf{T}}(t + \Delta t) = \tilde{\mathbf{T}}(t) + \tilde{\mathbf{A}} \cdot \tilde{\mathbf{T}}(t) \cdot \Delta t, \quad (11)$$

где  $\tilde{\mathbf{A}}$  – матрица, содержащая  $N$  строк и  $N$  столбцов, которая получается из  $\mathbf{A}$  добавлением в нее снизу  $N - M$  строк с элементами

$$\mathbf{A}_{LL'} = \begin{cases} \gamma_L, & \text{если } L = L', \\ 0, & \text{если } L \neq L', \end{cases} \quad L \in \Gamma; \quad L' \in \Omega.$$

Соотношение (11) можно записать следующим образом:

$$\tilde{\mathbf{T}}(t + \Delta t) = (\mathbf{E} + \tilde{\mathbf{A}} \cdot \Delta t) \cdot \tilde{\mathbf{T}}(t),$$

здесь  $\mathbf{E}$  – единичная матрица. Тогда, если  $\Delta t$  достаточно мало,

$$\mathbf{T}(t) = \left( \mathbf{E} + \tilde{\mathbf{A}} \cdot \Delta t \right)^{\frac{t-t_0}{\Delta t}} \cdot \mathbf{T}(t_0). \quad (12)$$

Из (12) следует, что

$$\begin{aligned} \mathbf{T}(t_0 + \Delta) &= \mathbf{U}(\Delta) \mathbf{T}(t_0), \\ \mathbf{U}(\Delta) &= \left( \mathbf{E} + \tilde{\mathbf{A}} \cdot \Delta t \right)^{\frac{\Delta}{\Delta t}}. \end{aligned} \quad (13)$$

Таким образом,  $\mathbf{U}(\Delta)$  – оператор эволюции или оператор временного сдвига на величину  $\Delta$  термического состояния системы. Отметим, что  $\mathbf{U}(\Delta)$  зависит не от начального состояния, а от граничных условий только через параметры  $\gamma_L$ . В частности, оператор  $\mathbf{U}(\Delta)$  имеет универсальный вид для стационарных граничных условий. Это позволяет легко пересчитывать динамику распределения температур для новых начальных и граничных условий. Важно также, что объем вычислений оператора  $\mathbf{U}(\Delta)$  медленно (логарифмически) увеличивается с ростом временного шага  $\Delta$ .

Процедуру вычислений с оператором эволюции можно применить и в случае кусочно-постоянных граничных условий. Если граничные условия меняются в момент времени  $t_1$ , то

$$\mathbf{T}(t_2) = \mathbf{U}(t_2 - t_1) \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{U}(t_1 - t_0),$$

где  $\mathbf{D}$  – диагональная матрица с элементами

$$D_{LL'} = \begin{cases} \frac{\theta_L(t_1 + 0)}{\theta_L(t_1 - 0)}, & \text{если } L = L', \\ 0, & \text{если } L \neq L'. \end{cases}$$

### Спектральные свойства оператора эволюции

Переход к пределу  $\Delta t \rightarrow 0$  в формуле (13) дает

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( \mathbf{E} + \tilde{\mathbf{A}} \cdot \Delta t \right)^{\frac{\Delta}{\Delta t}} \cdot \mathbf{T}(t_0) = \exp(\tilde{\mathbf{A}} \cdot \Delta) \cdot \mathbf{T}(t_0),$$

и оператор эволюции приобретает вид

$$\mathbf{U}(\Delta) = \exp(\tilde{\mathbf{A}} \cdot \Delta).$$

Очевидно, имеет место свойство

$$\mathbf{U}(\Delta_1) \cdot \mathbf{U}(\Delta_2) = \mathbf{U}(\Delta).$$

Пусть  $\mathbf{W} = [\mathbf{V}^{(1)}, \mathbf{V}^{(2)}, \dots, \mathbf{V}^{(N)}]$ , где  $\mathbf{V}^{(k)}$  – собственный вектор операторов  $\tilde{\mathbf{A}}$  и  $\mathbf{U}(\Delta)$  с собственными значениями  $\mu_k$  и  $\exp(\mu_k \Delta)$  соответственно [9]. Отметим, что операторы  $\tilde{\mathbf{A}}$  и  $\mathbf{U}(\Delta)$  не являются самосопряженными, поэтому их собственные векторы, вообще говоря, не ортогональны. Пусть  $\mathbf{M}$  – диагональная матрица с элементами  $\exp(\mu_k \Delta)$ . Тогда для оператора эволюции получаем выражение

$$\mathbf{U}(\Delta) = \mathbf{W} \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{W}^{-1}.$$

Разложим вектор термического состояния системы по собственному базису:

$$\mathbf{T}(t_0) = \sum_{k=1}^N C_k \mathbf{V}^k.$$

Тогда

$$\mathbf{T}(t) = \sum_{k=1}^N C_k \exp[\mu_k (t - t_0)] \mathbf{V}^k. \quad (14)$$

Далее ограничимся случаем стационарных граничных условий:  $\gamma_L = 0$  (см. уравнение (11)).

Из (14) и ограниченности  $\mathbf{T}(t)$  следует, что  $\mu_k \leq 0$ . Рассмотрим асимптотический случай  $t \rightarrow \infty$ , когда

$$\mathbf{T}(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{T}(t) = \sum_{\substack{k=1 \\ (\mu_k=0)}}^N C_k \mathbf{V}^k. \quad (15)$$

Состояния (15) – это состояния оператора  $\mathbf{U}(\Delta)$  с собственным значением 1 и оператора  $\tilde{\mathbf{A}}$  с собственным значением, равным 0. Действительно,

$$\begin{aligned} \mathbf{U}(\Delta) \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{U}(t) \mathbf{T}(t_0) &= \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{U}(\Delta) \mathbf{U}(t) \mathbf{T}(t_0) = \\ &= \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{U}(\Delta + t) \mathbf{T}(t_0) = \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{U}(t) \mathbf{T}(t_0). \end{aligned}$$

Итак, (15) – это стационарные состояния, которые зависят от граничных и не зависят от начальных условий для внутренних ячеек. Построим базис ядра оператора  $\tilde{\mathbf{A}}$  [9], выбирая в качестве «затравочных» состояния

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_0^{(1)} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{T}_0^{(2)} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}; \dots; \\ \mathbf{T}_0^{(N-M)} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (16)$$

Из (16) видно, что граничные условия (нижние  $N - M$  строк) линейно независимы, а начальные условия для  $M$  внутренних ячеек выбраны для определенности нулевыми. Рассмотрим стационарные состояния вида

$$\begin{aligned} \mathbf{T}^{(q)} = \lim_{\Delta \rightarrow \infty} \mathbf{U}(\Delta) \cdot \mathbf{T}_0^{(q)} \\ (q = 1, \dots, N - M). \end{aligned} \quad (17)$$

Покажем, что состояния (17) образуют базис ядра  $\tilde{\mathbf{A}}$ . Пусть  $\mathbf{T}$  – произвольное стационарное состояние. Рассмотрим состояние

$$\mathbf{T}' = \mathbf{T} + \sum_{q=1}^{N-M} D_q \mathbf{T}^{(q)} \quad (18)$$

и, используя линейную независимость граничных условий, выберем коэффициенты  $D_q$  так, чтобы  $\mathbf{T}'$  – стационарное состояние с нулевыми граничными условиями имело вид

$$\mathbf{T}' = \begin{pmatrix} t_1 \\ \vdots \\ t_M \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}.$$

В этом случае из-за выравнивания температур для внутренних ячеек получаем, что  $t_1 = t_2 = \dots = t_M = 0$ . То есть  $\mathbf{T}'$  – нулевой вектор. Тогда, в силу (18), состояния (17) формируют базис ядра оператора  $\tilde{\mathbf{A}}$ .

Представление термического состояния в виде (14) дает возможность его аппроксимации на том или ином временном интервале. Упорядочим собственные значения по величине  $0 \geq \mu_1 \geq \mu_2 \geq \dots \geq \mu_N$ . Тогда при  $t_1 \leq t \leq t_2$  получаем приближенное равенство

$$\mathbf{T}^{(q)}(t) \approx c_q + d_q \exp(\mu_k t),$$

если  $|\mu_{k+1} t_1| \gg 1$  и  $|\mu_{k-1} t_2| \ll 1$ , т.е. если  $\mu_k$  отделено от соседних собственных чисел достаточным интервалом.

### Детали и результаты расчетов

Расчеты температуры проводились на сетке ячеек, описанной ранее. Параметры разбиения по переменным  $r$  и  $z$  были выбраны следующим образом:

$$n_r = (10, 5, 5, 50), \quad n_z = (3, 20, 30). \quad (19)$$

Граничные условия заданы функцией  $T_b(r, z, t)$  (см. формулу (10))

$$T_b(r, z, t) = \begin{cases} T_A(t), & \text{если } (r = R_1 \wedge z \leq h) \vee \\ & \vee (z = 0 \wedge R_3 \leq r \leq R), \\ T_G(z), & \text{если } (z = H \wedge r \leq R) \vee \\ & \vee (z \leq H \wedge r = R), \end{cases}$$

где  $T_A(t)$  – температура атмосферного воздуха;  $T_G(z)$  – температура грунта на глубине  $z$  вдали от шахты. Если  $z$  выражено в метрах, то

$$T_G(z) = [6 + 0,1z] \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Размеры модели шахты приведены на рис. 1. Необходимо, однако, добавить, что слой грунта, прилегающий к дневной поверхности толщиной  $h_0 = 2$  м («слой промерзания»), рассматривается особо: он разбивается по высоте чаще, чем более глубокие слои грунта (см. формулу (19)):

$$\frac{h_0}{n_{z1}} < \frac{h - h_0}{n_{z2}} < \frac{H - h}{n_{z3}}.$$

Разбиение на ячейки по переменной  $Z$  тем мельче, чем сильнее зависит от нее температура на данном участке. Вблизи дневной поверхности зависимость температуры от глубины сильная из-за прямого контакта с атмосферой. Аналогичное правило действует в случае разбиения по радиусу.

В начальный момент температура во всех ячейках приравнивается температуре грунта  $T_G(z)$  (см. уравнение (10)). Влияние начальных условий на распределение температуры быстро нивелируется с течением времени. Поэтому, в разумных границах, они могут задаваться произвольно.

На торцах шахты наложены условия термоизоляции (рис. 1). В расчетах термоизоляция обеспечивается тем, что тепловой поток через соответствующую грань ячейки полагается равным нулю.

Нами были проведены расчеты термического режима системы ствол–грунт для 12 зимних периодов с 20 октября по 19 марта, начиная с 2005/2006 и заканчивая 2016/2017 годом. Данные о температуре атмосферы взяты на сетевом ресурсе [10]. Они содержат результаты измерений температуры воздуха через каждые 3 ч.

В расчетах использовались значения физических характеристик, приведенные в табл. 1. Для бетона приведены два значения коэффициента теплопроводности, которыми обладают современные сорта теплоизолирующего бетона.

Таблица 2 содержит основные результаты проведенных расчетов: периоды замерзания влажного грунта и их характеристики, которые произошли бы в прошедшие годы. Если какой-либо зимний период из диапазона 2005–2017 гг. отсутствует в таблице, то это означает, что замерзания в ту зиму не было. Данные относятся к глубине 35 м. С одной стороны, при меньшей глубине грунт, окружающий ствол, как правило, довольно мягок и образующийся лед деформирует грунт, а не конструкцию ствола. На глубине 35 м и ниже грунт обладает существенно более высокой плотностью, поэтому при образовании льда возникают большие механические напряжения, которые могут вызвать деформацию и разрушение конструкции. С другой стороны, из-за существующего общего тренда на большей глубине температура грунта выше и риск промерзания ниже.

Данные в табл. 2 получены при коэффициенте теплопроводности теплоизоляционно-

ТАБЛИЦА 1. Физические константы, использованные в расчетах

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Удельная теплоемкость, Дж/(К·кг)	Удельная теплопроводность, Вт/(К·м)
Бетон	850	880	0,17/0,10
Увлажненный грунт	1700	800	2,0
Грунт	1500	800	1,94

ТАБЛИЦА 2. Периоды замерзания влажного грунта на глубине 35 м при значении  $\lambda_{\text{бетона}} = 0,17 \text{ Вт/(К}\cdot\text{м)}$ 

Период	Средняя температура, °С	Минимальная температура, °С	Длительность, ч	Общая длительность, ч
05/06	-0,76	-1,17	96	210
	-0,50	-0,74	114	
09/10	-0,64	-1,02	162	216
	-0,25	-0,37	54	
10/11	-0,86	-1,59	231	231
11/12	-0,29	-0,52	126	126
15/16	-0,44	-0,65	105	105

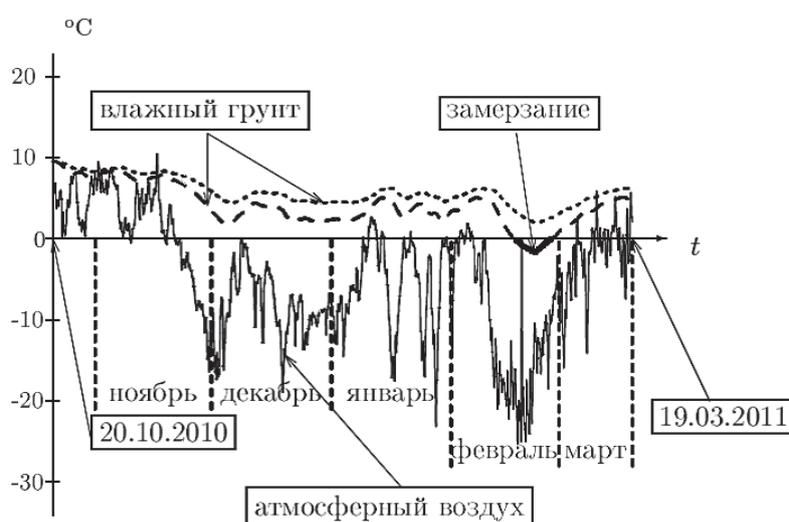


Рис. 2. Температуры атмосферы и влажного грунта зимой 2010/2011 года:

-----  $\lambda_{\text{бетон}} = 0,10 \text{ Вт/(К}\cdot\text{м)}$ ; - - - - -  $\lambda_{\text{бетон}} = 0,17 \text{ Вт/(К}\cdot\text{м)}$

го бетона  $0,17 \text{ Вт/(К}\cdot\text{м)}$ . При альтернативном значении коэффициента  $0,10 \text{ Вт/(К}\cdot\text{м)}$  замерзания не было вовсе.

Детальное поведение во времени температур атмосферного воздуха и влажного грунта в течение зимы 2010/2011 года приведено на рис. 2.

При реконструкции вентиляционных шахт с использованием бетона без специальных теплоизоляционных свойств с коэффициентом теплопроводности  $\lambda = 2,04 \text{ Вт/(К}\cdot\text{м)}$  процессы теплопередачи протекают относительно быстро, и замерзание грунта на глубине 35 м наступает уже при температуре атмосферы  $-2 \text{ }^\circ\text{С}$ .

## Заключение

Были проведены расчеты температурного режима вентиляционной шахты для 12 прошедших зимних периодов. Они показали, что на глубине, критической с точки зрения риска аварии (35 м), замерзание увлажненного грунта наступило бы 7 раз при теплопроводности бетона  $\lambda = 0,17 \text{ Вт/(К}\cdot\text{м)}$  и ни разу при  $\lambda = 0,10 \text{ Вт/(К}\cdot\text{м)}$ . Минимальная температура влажного грунта не опускалась бы ниже  $-1,6 \text{ }^\circ\text{С}$ . В то же время при применении обычного бетона ( $\lambda = 2,04 \text{ Вт/(К}\cdot\text{м)}$ ) замерзания имели место каждую зиму и температуры грунта достигали значения  $-20 \text{ }^\circ\text{С}$ . Это озна-

чает, что использование теплоизоляционного бетона очень существенно уменьшает риск аварии во время морозов.

### Библиографический список

1. Фоменко В.Н. К анализу теплового режима длинного воздуховода / В.Н. Фоменко, М.А. Шварц, В.В. Кондратенко // Труды Нац. науч.-метод. конференции «Математика в ВУЗе и школе». – СПб. : ПГУПС, 2017. – С. 126–131.

2. Фоменко В.Н. Анализ термического режима вентиляционной шахты метрополитена методом разделения переменных Фурье / В.Н. Фоменко, М.А. Шварц // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2018. – Т. 15, вып. 2. – С. 261–270.

3. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики : учеб. пособие для ун-тов. – 4-е изд., испр. / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – М. : Наука, 1972. – 735 с.

4. Самарский А.А. Вычислительная теплопередача / А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич. – М. : Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.

5. Самарский А.А. Теория разностных схем. – 3-е изд., испр. / А.А. Самарский. – М. : Наука, 1989. – 616 с.

6. Самарский А.А. Методы решения сеточных уравнений / А.А. Самарский, Е.С. Николаев. – М. : Наука, 1978. – 592 с.

7. Самарский А.А. Аддитивные схемы для задач математической физики / А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич. – М. : Наука, 2001. – 319 с.

8. Калиткин Н.Н. Численные методы / Н.Н. Калиткин. – М. : Наука, 1978. – 512 с.

9. Корн Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. ; пер. со 2-го амер. перераб. изд. И.Г. Арамановича, А.М. Березина, И.А. Вайнштейна, Л.З. Румшиского, Л.Я. Цлафа ; под ред. И.Г. Арамановича. – М. : Наука, 1974. – 831 с.

10. Сайт «Расписание Погоды», rp5.ru (дата обращения : 28.08.2018).

### References

1. Fomenko V.N., Shvarts M.A. & Kondratenko V.V. K analizu teplovogo rezhima dlinnogo vozdukhovoda [A contribution to analysis of thermal regime of long air duct]. *Trudy Nats. nauch.-metod. konferencii "Matematika v VUZe i shkole"* [Proc. of National sci.-method. conference "Mathematics in university and school"]. Saint Petersburg, Petersburg State Transport University Publ., 2017, pp. 126–131. (In Russian)

2. Fomenko V.N. & Shvarts M.A. Analiz termicheskogo rezhima ventilatsionnoi shakhty metropolitena metodom razdeleniia peremennykh Fur'e [Analysis of thermal regime of metro system's ventilation shaft by the Fourier variable separation method]. *Izvestiya Peterb. universiteta putei soobshcheniia* [Proc. of Petersburg Transport University]. Saint Petersburg, Petersburg State Transport University Publ., 2018, vol. 5, issue 2, pp. 261–270. (In Russian)

3. Tikhonov A.N. & Samarskii A.A. *Upravneniia matematicheskoi fiziki* [Mathematical physics equations]. Textbook for universities. 4<sup>th</sup> rev. ed. Moscow, Nauka Publ., 1972, 735 p. (In Russian)

4. Samarskii A.A. & Vabishchevich P.N. *Vychislitel'naia teploperedacha* [Computational heat transfer]. Moscow, Editorial URSS Publ., 2003, 784 p. (In Russian)

5. Samarskii A.A. *Teoriia raznostnykh skhem* [Difference scheme theory]. 3<sup>rd</sup> rev. ed. Moscow, Nauka Publ., 1989, 616 p. (In Russian)

6. Samarskii A.A. & Nikolaev E.S. *Metody resheniia setochnykh uravnenii* [Methods for solving finite-difference equations]. Moscow, Nauka Publ., 1978, 592 p. (In Russian)

7. Samarskii A.A. & Vabishchevich P.N. *Additivnye skhemy dlia zadach matematicheskoi fiziki* [Additive schemes for mathematical physics problems]. Moscow, Nauka Publ., 2001, 319 p. (In Russian)

8. Kalitkin N.N. *Chislennye metody* [Numerical methods]. Moscow, Nauka Publ., 1978, 512 p. (In Russian)

9. Korn G. & Korn T. *Spravochnik po matematike* [Korn G. & Korn T. Manual of Mathematics]. Ed. by I.G. Aramanovich. Moscow, Nauka Publ., 1974, 831 p. (In Russian)

10. Sait "Raspisanie pogody" ['Weather timetable' website]. URL: rp5.ru (accessed: 28.08.2018). (In Russian)

\*ФОМЕНКО Виктор Николаевич – д-р физ.-мат. наук, профессор, vfomenko1943@gmail.com; ШВАРЦ Михаил Александрович – канд. техн. наук, доцент, shvarts4545@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).



УДК 514.182.3

Т. Ю. Сафонова, А. Н. Зубков

## ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВЫ ОБЪЕКТА НА НАКЛОННОЙ И ВЕРТИКАЛЬНОЙ КАРТИНАХ

Дата поступления: 21.12.2018

Решение о публикации: 15.01.2019

### Аннотация

**Цель:** Продемонстрировать практическое применение технологий 3D-моделирования для проверки композиционных достоинств задуманного архитектурного сооружения. **Методы:** Используются методы компьютерного моделирования, анализ данных, способы оптимизационного проектирования – в реализации трех взаимосвязанных этапов. На первом этапе создана трехмерная модель строительного объекта с соблюдением нормативных требований, на втором этапе проанализированы особенности построения перспективных проекций и предложена их классификация, на третьем этапе эта конструктивная система подверглась более детальному моделированию с учетом особенностей перспективных проекций. **Результаты:** Принимая во внимание рациональные критерии, в частности высоту горизонта и число фокусов, были созданы перспективные проекции модели в программе AutodeskRevitArchitecture. **Практическая значимость:** Возможность и удобство применения перспективных проекций моделей при проектировании и реконструкции строительных объектов железных дорог для определения соответствия окончательного результата первоначальному композиционному замыслу. Статья может быть интересна инженерам-строителям, а также студентам и аспирантам, изучающим технологию строительства промышленных и гражданских зданий, железных дорог, мостов и транспортных тоннелей.

**Ключевые слова:** Перспектива, картинная плоскость, линия горизонта, точка зрения, фокус.

**Tat'yana Yu. Safonova**, chief teacher, tusafonova@list.ru; **Anatoliy N. Zubkov**, student, azubkov@my.com (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) SPECIFIC FEATURES OF BUILDING OBJECT PERSPECTIVE IN SLANTED AND VERTICAL PICTURES. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-1-149-156

### Summary

**Objective:** To demonstrate practical application of 3D-modelling technologies to check composition advantages of an intended architectural object. **Methods:** Methods of computer simulation, data analysis and optimization design were applied in implementation of three interrelated stages. At the first stage, a 3D-model of a construction object was created according to regulatory requirements. At the second stage, specific features of perspective projections were analysed, and a classification of these features was proposed. At the third stage, this structural system was being modelled in more detail, taking into consideration specific features of perspective projections. **Results:** Perspective model projections were created in the AutodeskRevitArchitecture program with due regard to rational criteria including the height of horizon and the number of focuses. **Practical importance:** The possibility and convenience of application of 3D-model perspective projections in design and reconstruction of railway construction

objects for matching final results with initial composition incentives. The article may be interesting for civil engineers, as well as for students and postgraduates studying the technology of construction of industrial and civil buildings, construction of railways, bridges and transport tunnels.

**Keywords:** Perspective, picture plane, horizon line, vantage point, focus.

## Введение

Архитектурный проект, выполненный в системе Revit, позволяет определить, какой результат будет получен в натуре и в какой мере он будет соответствовать первоначальному композиционному замыслу.

Среди различных способов выявления художественных достоинств архитектурного проекта и ожидаемого зрительного восприятия будущего сооружения наиболее простым способом является построение перспективного изображения. Одно из определений перспективы сформулировано А. Я. Зметным: «Перспектива есть наука, дающая теоретически обоснованные правила и приемы построения предмета в том виде, в каком он представляется нашему глазу при непосредственном рассматривании его в пространстве» [1, с. 6]. Перспективой принято называть также и собственно само изображение (условную форму), построенную по законам и правилам перспективы.

Приступая к изложению последовательности построения перспективной проекции модели (ППМ) в Revit, обратим внимание на то, что в повседневной жизни мы постоянно сталкиваемся с перспективными изображениями на плоскости: в частности, к ним относятся фотографии. Обзор фотографий Пе-

тербургского государственного университета путей сообщения (рис. 1) свидетельствует о том, что высотные доминанты зданий изображаются наклоненными друг к другу, чего, конечно же, нет на самом деле. Как определить натуральные размеры объекта с имеющегося фотоснимка? Ответ на такой вопрос освещен в работе Н. Б. Шкиновой [2]. Как рассчитать эффект перспективы? В настоящей работе постараемся на это ответить.

Известно, что геометрической основой перспективы является метод центрального проецирования. Из известных сейчас определений перспективы следует, что взаимное положение центра проекций (точки зрения), объекта и плоскости проекций должно удовлетворять определенным условиям, при которых изображение предмета было бы наиболее близким к его зрительному восприятию в натуре. В общем случае при построении перспективы положение плоскости проекций в пространстве может быть произвольным, в частном случае – вертикальным. В практике архитектурного проектирования в подавляющем большинстве применяется вертикальная плоскость проекций (в дальнейшем – картина). Это обусловлено достаточно полно разработанной методикой построений [3–14], сравнительной их простотой и в известной мере

*а*



*б*



Рис. 1. Фотографии ПГУПС:  
*а* – ректорский (полуциркульный) корпус; *б* – Дворец физической культуры

сложившейся традицией. Однако перспективы на вертикальной картине обладают некоторыми существенными недостатками, к главному относится наличие значительных искажений в передаче видимых форм.

В значительной мере отмеченные искажения устраняются в перспективе на наклонной картине. Явление схода в одну точку вертикальных линий обусловлено тем, что они при наклонной картине уже не параллельны ей и, следовательно, подчиняются в данном случае закону о точках схода перспектив параллельных прямых, наклонных к картине [3]. Несовершенство линейных перспектив на вертикальной картине и необходимость широкого внедрения в проектную практику перспектив на наклонной картине неоднократно отмечались в работах геометров и архитекторов: А. Я. Зметного [1], А. П. Барышникова [15], М. В. Федорова, Ю. И. Короева [16], А. Г. Климухина [8], И. А. Шерешевского [17] и др.

Цель настоящей работы – технология формирования ППМ (рис. 2) на вертикальную и наклонную картины в системе Revit.

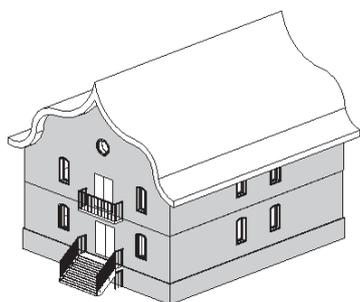


Рис. 2. 3D-вид модели (аксонометрическая проекция)

### Последовательность построения ППМ [17]

1. На панели «Диспетчер проектов» откроем вид (начнем построение ППМ с вида в плане).

2. На *Ленте* выберем вкладку «Вид» → панель «Создание» → раскрывающийся список «3D вид» → «Камера».

3. Щелчок мышью в области рисования размещает камеру. Согласно способу архитекторов, пользователь задает точку стояния  $S$ . Для более точной фиксации точек в области рисования возможно применение сетки активной рабочей плоскости. На *Ленте* выберем вкладку «Главная» → панель «Рабочая плоскость» → раскрывающаяся панель «Рабочая плоскость» → «Задать». Расстояние ее от модели выбирается таким образом, чтобы угол обзора  $\alpha$  (угол активного зрения) был в пределах 28–30°. В Revit же не существует величина 50° для угла активного зрения (рис. 3, а, б).

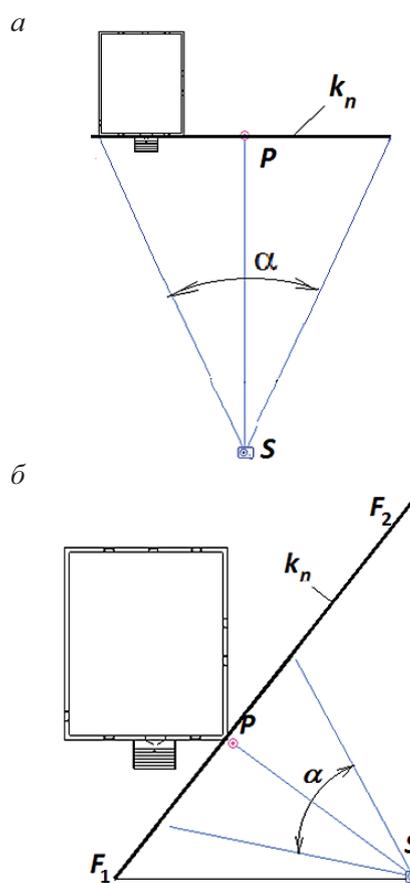


Рис. 3. Выбор точки зрения и положения картины:

а – одна из стен модели параллельна плоскости картины (частный случай);  
б – расположение модели в случайном положении к плоскости картины

4. Повторный щелчок мышью в области рисования фиксирует главную точку картины  $P$  (точку пересечения главного луча с картин-

ной плоскостью). Перпендикулярно главному лучу зрения определяется основание картинной плоскости  $k_n$ .

5. Система автоматически переходит на вертикальную картину с изображением ППМ.

### Первая особенность построения ППМ (число фокусов)

Линейная перспектива, рассчитанная на фиксированную точку зрения и предполагающую точку (точки) схода лучей (фокус) на линии горизонта, включает следующие виды:

*фронтальная перспектива* – вид, расположение какой-либо фигуры, объема, композиции перпендикулярно главному лучу зрения, прямо спереди, то же, что анфас;

*угловая перспектива* – вид с угла, восприятие здания не фронтально (спереди) или сбоку (с бокового фасада), а под определенным углом (спереди и сбоку).

Фронтальная перспектива (рис. 4, *а*), полученная при вертикальном положении картины в плане, приведенном на рис. 3, *а*, подразуме-

вает наличие одной точки схода лучей (фокуса). Для этой ППМ все параллельные линии, идущие под прямым углом к картине, сходятся в фокусе, лежащем на линии горизонта. Все параллельные между собой линии, расположенные параллельно картине, не имеют точек схода.

Угловая перспектива (рис. 4, *б*), полученная при вертикальном положении картины в плане, представленном на рис. 3, *б*, подразумевает наличие двух точек схода лучей (фокусов).

### Вторая особенность построения ППМ

Следующей (второй для настоящей работы) особенностью построения ППМ является высота линии горизонта  $h$  (рис. 5).

Перспективу с высоким горизонтом ( $h = 25-100$  м и более), когда наблюдатель рассматривает модель с возвышенной точки зрения, например с холма или соседнего здания (рис. 5, *а*), применяют при изображении городских кварталов, поселков, сооружений

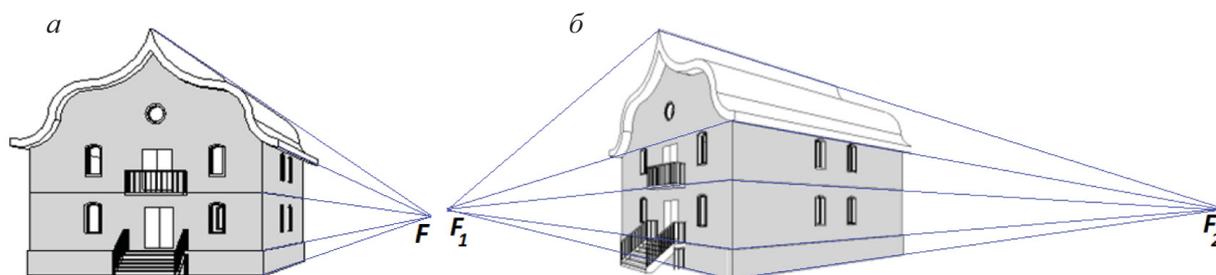


Рис. 4. Линейная перспектива модели при одной (*а*) и двух (*б*) точках схода следов



Рис. 5. Построение ППМ на вертикальной картине при разном уровне линии горизонта (объяснение в тексте)

и т. д. Перспектива с нормальной высотой горизонта, равной высоте человеческого роста ( $h = 1,6-2$  м), показана на рис. 5, б. Перспектива с линией горизонта, совпадающей с основанием картины (рис. 5, в), может быть получена, если предположить, что наблюдатель лежит на земле (к такой перспективе прибегают очень редко).

Перспектива с низким горизонтом (рис. 5, з) применяется при изображении зданий, расположенных на горе, берегу реки или моря, т. е. в случаях, когда наблюдатель находится много ниже изображаемых объектов. Перспективу с линией горизонта, расположенной посередине высоты модели (рис. 5, д), использовать не рекомендуется, так как создается монотонность изображения.

### Третья особенность построения ППМ

Как было выше отмечено, характерная особенность ППМ – наличие точки (точек) схода

лучей. Вертикальный вид положения картины (рис. 5), а также горизонтальный являются частными случаями. Главнейшее преимущество перспективы на наклонной картине заключается в том, что она базируется на общем случае центрального проецирования. Обратимся теперь к линейной перспективе, рассчитанной на фиксированную точку зрения и предполагающей три точки схода лучей.

В действительности (см. рис. 1) существует явление кажущегося перспективного сокращения размеров всех предметов по мере их удаления от наблюдателя в любом направлении (а не только в глубину). Перспективы на наклонной плоскости имеют третью точку схода – точку схода перспектив вертикальных прямых. Ее наличие обусловлено сокращением размеров изображаемых элементов по вертикали и горизонтали с изменением высоты их положения. При этом картинная плоскость наклонена на наблюдателя, если линия горизонта находится низко, и, наоборот, от наблюдателя, если линия горизонта находится высоко (рис. 6) [16].

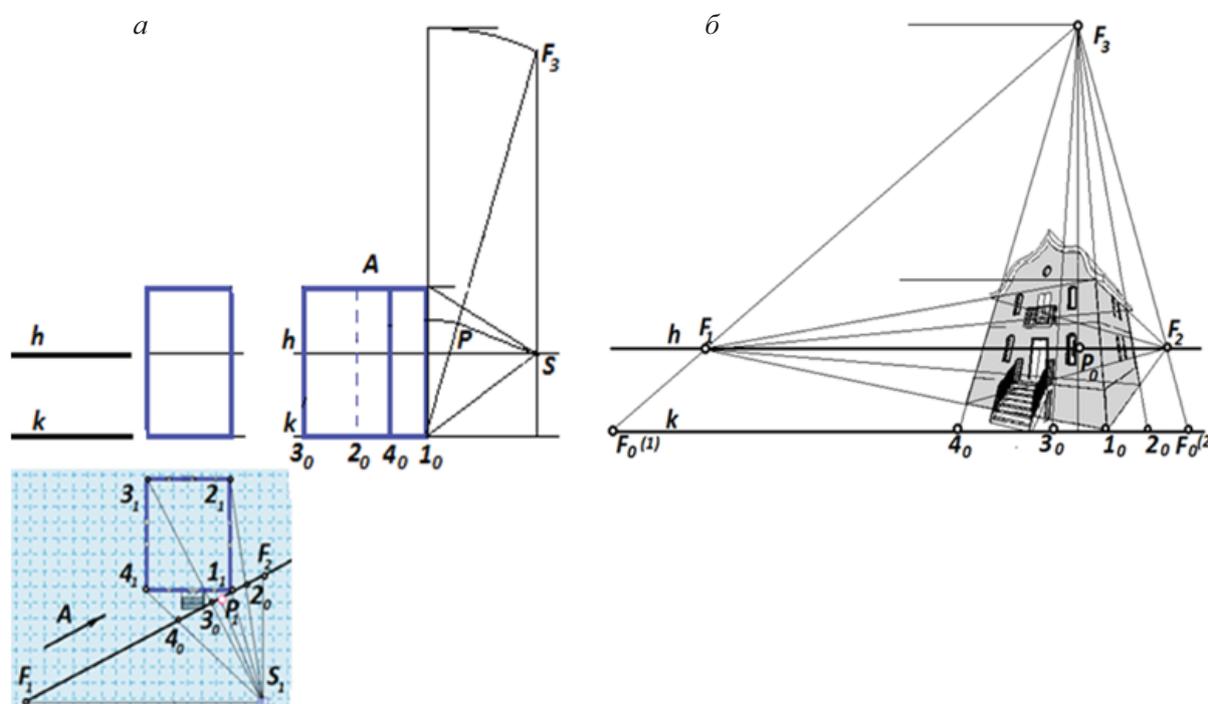


Рис. 6. Алгоритм построения перспективы объекта с тремя точками схода:  
а – ортогональные проекции модели; б – ППМ на наклонной картине

## Редактирование ППМ

В системе Revit имеется ряд возможностей для редактирования ППМ.

1. Допустим, требуется построить точно такую же ППМ (*по умолчанию система предлагает пользователю вертикальную картину и нормальную высоту горизонта (1750)*), только линию горизонта нужно установить уже на другой высоте. Для этого на панели «Свойства» выберем такие действия:

1) изменим высоту в ячейке «Высота глаза наблюдателя»;

2) изменим высоту в ячейке «Высота точки цели» (необходимое условие: оба параметра должны иметь одинаковое значение);

3) нажмем «Применить».

2. Преобразование ППМ на вертикальной картине в ППМ на наклонной картине продолжим, изменяя параметры в указанных выше ячейках. Отметим, что «Высота глаза наблюдателя» характеризует в Revit высоту горизонта ППМ, а «Высота точки цели» – превышение между высотами глаза наблюдателя и третьей точкой схода  $F_3$  для вертикальных прямых. Причем чем больше эта величина, тем сильнее картинная плоскость наклонена к наблюдателю или же отклонена от него (рис. 6).

3. Наглядность и выразительность ППМ зависит от правильности выбора положения картины и точки зрения [2]. Перетаскивание камеры в Revit дает возможность показать те или иные достоинства архитектурного объекта, а также скрыть те или иные его недостатки. Для этого выполним следующие действия:

1) на панели «Диспетчер проектов» выделим 3D вид 1;

2) в области рисования выделим рамку границы подрезки;

3) на панели «Диспетчер проектов» откроем план этажа;

4) система автоматически перейдет на план этажа с установленной камерой;

5) зажатой левой кнопкой мыши перетянем камеру на новое место.

## Использование фронтальных проекций (фасадов и разрезов) для построения ППМ

1. На панели «Диспетчер проектов» откроем вид «Фасад» («Разрез»).

2. На *Ленте* выберем вкладку «Вид» → панель «Создание» → раскрывающийся список «3D вид» → «Камера».

3. Щелчок мышью в области рисования размещает камеру. Пользователь располагает возможностью зафиксировать высоту горизонта  $h$ .

4. Повторный щелчок мышью в области рисования фиксирует главную точку картины  $P$ . Перпендикулярно главному лучу зрения определяется основание картинной плоскости  $k_n$ .

5. Система автоматически переходит на картинную плоскость с изображением ППМ: – в одном случае это *фронтальная перспектива на вертикальной картине* с одним фокусом схода лучей (если направление главного луча зрения параллельно горизонтальным прямым на выделенном фасаде);

– в другом случае – *фронтальная перспектива на наклонной картине* с двумя фокусами схода лучей (если направление главного луча зрения не параллельно горизонтальным прямым на выделенном фасаде).

## Заключение

Инструментарий работы с ППМ не только обеспечивает быстрое их построение, но и позволяет выявить художественные достоинства архитектурного проекта. Технология формирования перспективы объекта, реализованная в системе Revit (см. [18]), дает возможность моделировать любые креативные дизайнерские решения в строительстве.

## Библиографический список

1. Зметный А. Я. Линейная перспектива на наклонной плоскости / А. Я. Зметный. – Л. : Стройиздат, 1968. – 202 с.

2. Шкинева Н. Б. Основы реконструкции перспективы и архивного фотоснимка / Н. Б. Шкинева. – М. : Инфра-М, 2017. – 64 с.
3. Марфельд Р. Р. Построение архитектурных перспектив / Р. Р. Марфельд. – М. ; Л. : Гос. изд-во, 1930. – 200 с.
4. Разов Д. В. Методы построения перспектив в архитектуре / Д. В. Разов. – М. ; Л. : Госстройиздат, 1939. – 121 с.
5. Дейнеко В. Ф. Теория перспективы / В. Ф. Дейнеко. – М. : Геодезиздат, 1949. – 85 с.
6. Тимрот Е. С. Построение архитектурных перспектив на плоскости / Е. С. Тимрот. – М. : Изд-во по строительству и архитектуре, 1957. – 148 с.
7. Владимирский Г. А. Перспектива / Г. А. Владимирский. – М. : Учпедгиз, 1958. – 121 с.
8. Климухин А. Г. Тени и перспектива / А. Г. Климухин. – М. : Стройиздат, 1967. – 200 с.
9. Петерсон В. Е. Перспектива / В. Е. Петерсон. – М. : Искусство, 1970. – 183 с.
10. Соловьев С. А. Перспектива / С. А. Соловьев. – М. : Просвещение, 1981. – 143 с.
11. Раушенбах Б. В. Системы перспективы в изобразительном искусстве. Общая теория перспективы / Б. В. Раушенбах. – М. : Наука, 1986. – 256 с.
12. Тарасов Б. Ф. Методы изображения в транспортном строительстве / Б. Ф. Тарасов. – Л. : Стройиздат, 1987. – 248 с.
13. Макарова М. Н. Перспектива / М. Н. Макарова. – М. : Просвещение, 1989. – 191 с.
14. Норлинг Э. Объемный рисунок и перспектива / Э. Норлинг ; пер. с англ. М. Авдоиной. – М. : Эксмо, 2004. – 160 с.
15. Барышников А. П. Перспектива / А. П. Барышников. – М. ; Л. : Искусство, 1949. – 126 с.
16. Короев Ю. И. Архитектура и особенности зрительного восприятия / Ю. И. Короев, М. В. Федоров. – М. : Гос. изд-во лит. по строительству и архитектуре, 1954. – 136 с.
17. Шерешевский И. А. Построение изображений методом перспективных координат / И. А. Шерешевский. – М. ; Л. : Госстройиздат, 1957. – 61 с.
18. Мовчан Д. А. Технология BIM для архитекторов : Autodesk Revit Architecture 2010 : офиц. учеб. курс / Д. А. Мовчан. – М. : ДМК Пресс, 2010. – 600 с.

## References

1. Zmetnyi A. Ya. *Lineinaia perspektiva na naklonnoi ploskosti* [Linear perspective in slanted plane]. Leningrad, Stroiizdat Publ., 1968, 202 p. (In Russian)
2. Shkineva N. B. *Osnovy rekonstruktsii perspektivy i arkhivnogo fotosnimka* [Basic concepts in reconstruction of perspective and archival photo]. Moscow, Infra-M Publ., 2017, 64 p. (In Russian)
3. Marfel'd R. R. *Postroenie arkhitekturnykh perspektiv* [Constructing architectural perspectives]. Moscow and Leningrad, Gosizdat, 1930, 200 p. (In Russian)
4. Razov D. V. *Metody postroeniia perspektiv v arkhitekture* [Methods for constructing perspectives in architecture]. Moscow and Leningrad, Gosstroizdat Publ., 1939, 121 p. (In Russian)
5. Deineko V. F. *Teoriia perspektivy* [Theory of perspective]. Moscow, Geodezizdat Publ., 1949, 85 p.
6. Timrot E. S. *Postroenie arkhitekturnykh perspektiv na ploskosti* [Constructing architectural perspectives on a plane]. Moscow, Izdatel'stvo po stroitel'stvu i arkhitekture, 1957, 148 p. (In Russian)
7. Vladimirsii G. A. *Perspektiva* [Perspective]. Moscow, Uchpedgiz Publ., 1958, 121 p. (In Russian)
8. Klimukhin A. G. *Teni i perspektiva* [Shadows and perspective]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1967, 200 p. (In Russian)
9. Peterson V. E. *Perspektiva* [Perspective]. Moscow, Iskusstvo Publ., 1970, 183 p. (In Russian)
10. Solov'ev S. A. *Perspektiva* [Perspective]. Moscow, Prosveshchenie Publ., 1981, 143 p. (In Russian)
11. Raushenbakh B. V. *Sistemy perspektivy v izobrazitel'nom iskusstve. Obshchaia teoriia perspektivy* [Perspective systems in figurative arts. General theory of perspective]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 256 p. (In Russian)
12. Tarasov B. F. *Metody izobrazheniia v transportnom stroitel'stve* [Image methods in transport construction]. Leningrad, Stroiizdat Publ., 1987, 248 p. (In Russian)
13. Makarova M. N. *Perspektiva* [Perspective]. Moscow, Prosveshchenie Publ., 1989, 191 p. (In Russian)
14. Norling E. *Ob'emnyi rusinok i perspektiva* [Perspective made easy]. Tr. from angl. M. Avdonina. Moscow, Eksmo Publ., 2004, 160 p. (In Russian)

15. Baryshnikov A. P. *Perspektiva* [Perspective]. Moscow and Leningrad, Iskusstvo Publ., 1949, 126 p. (In Russian)
16. Koroev Yu. I. & Fedorov M. V. *Arkhitektura i osobennosti zritel'nogo vospriiatiia* [Architecture and the specifics of visual perception]. Moscow, Izdatel'stvo po stroitel'stvu i arkhitekture Publ., 1954, 136 p. (In Russian)
17. Shereshevskii I. A. *Postroenie izobrazhenii metodom perspektivnykh koordinat* [Imaging by perspective co-ordinates method]. Moscow and Leningrad, Gosstroizdat Publ., 1957, 61 p. (In Russian)
18. Movchan D. A. *Tekhnologiya BIM dlia arkhitektorov: AutodeskRevitArchitecture 2010* [BIM technology for architects: AutodeskRevitArchitecture 2010]. Moscow, DMK Press Publ., 2010, 600 p. (In Russian)

\*САФОНОВА Татьяна Юрьевна – старший преподаватель, [tusafonova@list.ru](mailto:tusafonova@list.ru); ЗУБКОВ Анатолий Николаевич – студент, [azubkov@my.com](mailto:azubkov@my.com) (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 614.835

**А. Н. Елизарьев, Р. Г. Ахтямов, М. А. Киселева, Д. А. Тараканов,  
Д. М. А. Тараканов, Д. О. Яковлев, П. А. Михайлов**

## **РАЗВИТИЕ МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ОЦЕНКИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЭФФЕКТА BLEVE ПРИ АВАРИЯХ НА ОБЪЕКТАХ ХРАНЕНИЯ ТОПЛИВ**

Дата поступления: 27.12.2018

Решение о публикации: 24.01.2019

### **Аннотация**

**Цель:** На фоне выработки ресурсов, роста износа и срока эксплуатации резервуарного парка угроза возникновения эффекта BLEVE диктует необходимость развития методических основ оценки опасностей и возможностей появления такого эффекта на объектах хранения нефтегазопродуктов с учетом существующих подходов. **Методы:** Анализ опасностей и оценка эффекта BLEVE базируются на трех распространенных подходах, которые изложены в стандартах или предлагаются различными исследователями, в том числе на основе оценки геометрической вероятности. **Результаты:** Проведен анализ опасностей от эффекта BLEVE, а также трех подходов для его оценки. Разработан интегральный подход, который учитывает вероятность попадания резервуара в зону с критическим уровнем теплового излучения, время воздействия, а также особенности конструкции резервуара. **Практическая значимость:** Предложенный подход для оценки рассматриваемого явления позволяет провести оперативную, точную и обоснованную оценку возникновения эффекта BLEVE на объектах хранения нефтегазопродуктов.

**Ключевые слова:** Безопасность, эффект BLEVE, авария, нефтегазопродукты, резервуар, резервуарный парк, анализ опасностей, вероятность возникновения.

**Aleksei N. Elizaryev**, Cand. Geogr. Sci., associate professor, elizaryev@mail.ru (Ufa State Aviation Technical University); **\*Rasul G. Ahtyamov**, Cand. Eng. Sci., associate professor, ahtamov\_zchs@mail.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University); **Marina A. Kiseleva**, senior lecturer, kismarina63@gmail.com; **Denis A. Tarakanov**, student, tarakanov021098@gmail.com; **Dmitry A. Tarakanov**, student, tarakanovdima11@gmail.com; **Daniil O. Yakovlev**, student, fatoom82@mail.ru; **Pavel A. Mikhailov**, student, linori@mail.ru (Ufa State Aviation Technical University)  
DEVELOPMENT OF BASIC PROCEDURES FOR EVALUATION OF OCCURRENCE OF BLEVE EFFECT IN ACCIDENTS AT FUEL STORAGE FACILITIES. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-1-157-167

### **Summary**

**Objective:** Against the backdrop of resource depletion, increasing wear and combined service life of tank farm, the threat of occurrence of the BLEVE effect makes it necessary to develop basic methodological procedures for assessing the dangers and possibilities for the occurrence of the BLEVE effect at oil and gas storage facilities, taking into account existing approaches. **Methods:** Hazard analysis and assessment of the likelihood of the occurrence of BLEVE effect are based on three common approaches that are set out in the guidelines or proposed by various researchers, including on the basis of an estimate of the geometric probability. **Results:** The analysis of the hazards of occurrence of the BLEVE effect and the three approaches to assess the possibility of the BLEVE effect was carried out. On their basis an integral approach is proposed, accounting for the probability of the reservoir entering the zone with a critical level of thermal radiation, exposure time, and the design features of the reservoir. **Practical importance:** The

proposed approach for assessing the possibility of occurrence of the phenomenon under consideration makes it possible to conduct timely, accurate and justified assessment of the occurrence of the BLEVE effect at oil and gas storage facilities.

**Keywords:** Safety, BLEVE effect, accident, oil and gas product, tank, tank farm, hazard analysis, probability of occurrence.

На сегодняшний день темпы развития нефтегазодобывающей и нефтегазоперерабатывающей отраслей продолжают расти, несмотря на множество проблем, оказывающих влияние на экономику России, поскольку без нефтегазопродуктов жизнедеятельность современного человека невозможна.

При обращении с нефтегазопродуктами необходим тщательный контроль за безопасностью. Основная опасность заключается в их токсичности и пожароопасности в штатном и аварийном режимах, как для состояния окружающей среды, так и для населения. Особое место в функционировании предприятий нефтегазопереработки и нефтегазообеспечения занимает хранение. К основным сооружениям, обеспечивающим рациональное хранение нефтегазопродуктов, относятся резервуарные парки [1].

Резервуарный парк представляет собой группу резервуаров разных типов или однотипных. Он состоит из комплекса связанных между собой резервуаров и емкостей, используемых для хранения нефтегазопродуктов.

Резервуарами, как правило, называют стационарные сосуды, герметично закрываемые или открытые, наполняемые жидкими либо газообразными веществами. Группы резервуаров в обязательном порядке оснащают комплексами автоматизации, защитными системами, насосным оборудованием, запорными устройствами и системами экономии топлива. Каждая группа наземных резервуаров или отдельно стоящих резервуаров должны быть ограждены сплошным земляным валом или стеной, рассчитанными на гидростатическое давление разлившейся жидкости из резервуара [1].

При эксплуатации резервуарных парков проводится комплекс мер и процессов, направленный на обеспечение нормального

приема и сдачи нефти, нормальной работоспособности парка, его ремонт, диагностирование и обслуживание, однако резервуарный парк по-прежнему остается достаточно сложным и опасным объектом [2].

При крупномасштабных пожарах в резервуарных парках как объектах хранения нефтегазопродуктов за время прибытия, боевого развертывания, локализации и тушения соседние резервуары, находящиеся в непосредственной близости от геометрического центра пожара пролива, подвержены высокому тепловому излучению, что может вызвать эффект BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) и привести к возникновению вторичных очагов поражения. Так, например, можно указать на две аварии, наиболее широко описанные в литературе [3].

На терминале сжиженного углеродного газа (СУГ) PEMEX в Мехико-Сити (Мексика) в 1984 г. произошли большой пожар и серия взрывов. В первой фазе аварии началась утечка СУГ. С последним взрывом и обширным пожаром через 5 мин появилось первое явление BLEVE, а через 1 мин – еще одно из самых обширных (на одном из сферических резервуаров с меньшим объемом) с появлением огненного шара. Из огненного шара падали капли СУГ, которые покрыли территорию слоем СУГ. В течение последующего часа было еще 15 взрывов. Явление BLEVE затем настало на всех четырех сферических резервуарах с меньшим объемом и на множестве цилиндрических резервуарах. Образовалось большое количество фрагментов. Цилиндрические резервуары весом 20 т были отброшены взрывом на расстояние около 100 м, один даже на расстояние 1200 м. Фрагменты нанесли ущерб как своей кинетической энергией, так и высокой температурой [4].

На ЛПДС «Конда» в Югре (Россия) в 2009 г. произошел крупный пожар: в результате попадания молнии взорвалось паровоздушное пространство стального вертикального резервуара (РВС), что вызвало разрушение и смещение его крыши. Вследствие этого возник эффект BLEVE на расположенном рядом РВС с появлением огненного шара, который сопровождался разлетом осколков по всей территории ЛПДС, что привело к выбросу и разливу на большую территорию горячей нефти. В результате пожара были полностью разрушены три РВС, получили значительные повреждения три резервуара, два резервуара остались без повреждений. Максимальная площадь пожара составила 40 000 м<sup>2</sup> [5].

Эффект BLEVE наблюдается при катастрофическом отказе (разрыве, поломке) резервуара, содержащего жидкость, сильно перегретую по сравнению со своей нормальной атмосферной точкой кипения, а также распространяется на резервуары, содержащие сжиженный газ под давлением или жидкость под давлением. За этим эффектом следует, как правило, разлет (разброс) частей. Если вещество воспламеняемо, аэрозоль из смеси вещества и воздуха может незамедлительно воспламениться. Фронт пламени быстро распространяется от точки воспламенения, образуя огненный шар (столб), температура которого чрезвычайно

высока, что вызывает значительную тепловую радиацию [6].

Анализ литературных и статистических данных позволил установить вероятные последствия таких аварий с эффектом BLEVE (рис. 1).

Как видно из рис. 1, при авариях на резервуарах с эффектом BLEVE вероятнее всего будет наблюдаться огненный шар с разлетом осколков, что увеличивает угрозу дальнейшего развития чрезвычайной ситуации (ЧС). Поэтому наиболее опасны взрывы этого типа при пожарах рядом с сосудами, содержащими сжиженные газы. В таком случае действуют несколько факторов, направленных на взрыв:

- сжиженный газ уже при комнатной температуре находится в перегретом состоянии, его нагрев только повышает степень перегрева и ведет к росту давления в сосуде;
- слой газа над жидкостью снижает теплоотвод от стенки и способствует ее большему нагреву и понижению прочности;
- облако, вышедшее из сосуда, может быть сразу подожжено огнем или нагретыми предметами [7].

Для обеспечения пожарной безопасности существует множество способов предотвращения опасности взрыва. Одним из них является использование предохранительного клапана, которым обычно оснащают сосуды,

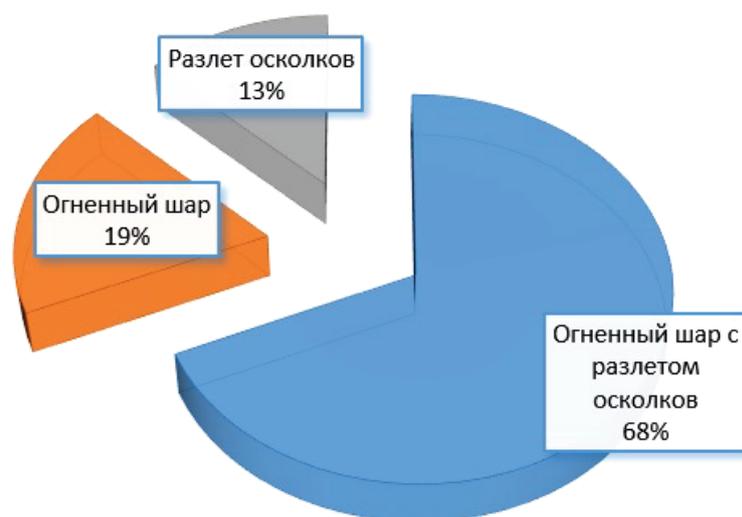


Рис. 1. Возможные последствия аварии [7]

позволяющий постепенно стравливать давление в сосуде, сохраняя при этом контроль над кипением жидкости, до того, как корпус разрушится из-за избыточного давления. Однако известны случаи засорения и замерзания предохранительного клапана, что сказывается на его работоспособности и увеличивает вероятность отказа. В связи с этим необходимо прогнозировать возможность появления эффекта BLEVE, а также его последствий.

Анализ литературных данных показал, что есть множество подходов для оценки эффекта BLEVE, среди которых интерес вызывают три.

Широкое применение имеет методика оценки вероятного возникновения эффекта BLEVE согласно ГОСТ Р 12.3.047–2012 [8]. В ней рассчитывается показатель  $\delta$ , который характеризует вероятность образования волн сжатия. Он зависит от свойств хранящегося вещества и технологических особенностей предохранительных клапанов резервуара. Исходя из расчета показателя  $\delta$ , выводят два условия: если  $\delta < 0,35$ , то эффект BLEVE не проявляется; если  $\delta > 0,35$ , то наиболее вероятно его возникновение [8].

Второй подход основан на представлении процессов и явлений как случайных событий. Для оценки устойчивости резервуаров возможно использование метода по определению геометрической вероятности в условиях равновероятного проявления эффекта BLEVE на территории объекта [9].

В третьем подходе, исходя из оценки пределов огнестойкости материала резервуара и

давления, появляющегося внутри него, возможно частично учесть конструктивные особенности резервуара. На основании прогноза обстановки при пожаре рассчитывается предел огнестойкости для резервуаров, находящихся в зоне действия теплового излучения пожара, и определяется возможность разгерметизации резервуара в зависимости от интенсивности теплового излучения, температуры и времени их воздействия, с учетом материала резервуара [9].

Для повышения точности оценки возможности возникновения эффекта BLEVE целесообразно объединить особенности применения и методические основы, на которых базируются второй и третий подходы (рис. 2).

Сначала на основе оценки геометрической вероятности необходимо установить границы объектов, рассматриваемых при определении вероятности того, что резервуар попадет на заданную территорию, и он будет подвержен тепловой радиации от пожара пролива. Тогда данную вероятность можно рассчитать по формуле

$$P_{\text{мест}} = \frac{\sum_{i=1}^n S_{\text{осн.рез}}}{S_{\text{рассм.тер}}} \cdot \frac{S_{\text{крит.тепл.возд}}}{S_{\text{рассм.тер}}},$$

где  $n$  – количество резервуаров на обследуемой территории (территория, объединенная особенностями рельефа местности или единым обвалованием ( $S_{\text{рассм.тер}} = S_{\text{обвл}}$ )), шт.;  $S_{\text{осн.рез}}$  – площадь основания резервуара, м<sup>2</sup>;  $S_{\text{крит.тепл.возд}}$  – площадь рассматриваемой территории, м<sup>2</sup>;

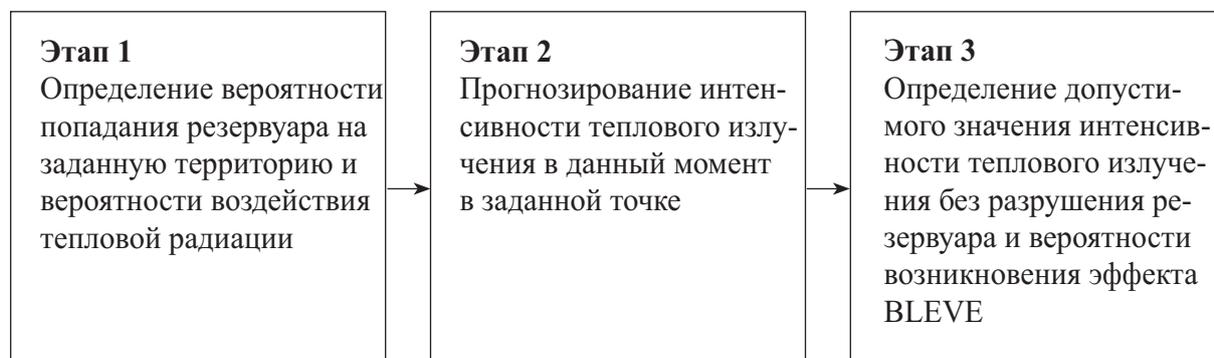


Рис. 2. Алгоритм определения вероятности возникновения эффекта BLEVE

$S_{\text{крит.тепл.возд}}$  – площадь с критическим уровнем теплового излучения, распространяемого от пожара пролива, при котором происходит разрушение резервуара,  $\text{м}^2$ .

Если площадь критического уровня теплового излучения от пожара пролива не затрагивает площадь резервуаров, то вероятность возникновения эффекта BLEVE минимальна (рис. 3, а). Однако если резервуар находится в зоне критического уровня теплового излучения (рис. 3, б), то вероятность образования данного явления повышается, так как в результате нагрева температура в резервуаре начинает возрастать. Интенсивность теплового излучения напрямую обуславливается расстоянием от источника излучения до резервуара, что требует прогноза пространственного распределения уровней теплового излучения.

Для определения вероятности разгерметизации и последующего разрушения резервуара под влиянием тепловой радиации можно рассмотреть величину  $P_{\text{разр}}$ , которая зависит от интенсивности теплового излучения и температуры в заданной точке пожара пролива, а также от времени воздействия.  $P_{\text{разр}}$  имеет условие, выполнение которого приведет к разгерметизации и последующему за ней раз-

рушению нагреваемого резервуара, с учетом конструктивных особенностей при расчете предела огнестойкости резервуара:

$$J_{\text{задан}} = f(t) > J_{\text{доп}},$$

где  $J_{\text{задан}}$  – интенсивность теплового излучения в данный момент в заданной точке,  $\text{кВт}/\text{м}^2$ ;  $J_{\text{доп}}$  – интенсивность, преодоление которой ведет к разрушению резервуара,  $\text{кВт}/\text{м}^2$ ;  $t$  – время, в течение которого на резервуар оказывала влияние интенсивность теплового излучения, с.

Для расчета  $J_{\text{задан}}$  используются методические подходы, на которых базируются методика в ГОСТ Р 12.3.047–2012 [8] и методика, утвержденная Приказом МЧС РФ от 14 декабря 2010 г. № 649 [10]. Для примера были проведены расчеты изменения интенсивности теплового излучения в зависимости от расстояния от геометрического центра пролива при пожаре пролива бензина площадью  $200 \text{ м}^2$ , результаты которых приведены на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что интенсивность теплового излучения, рассчитанная по методике, изложенной в ГОСТ 12.3.047–2012 [8] меньше, чем рассчитанная по методике [10]. Поэтому

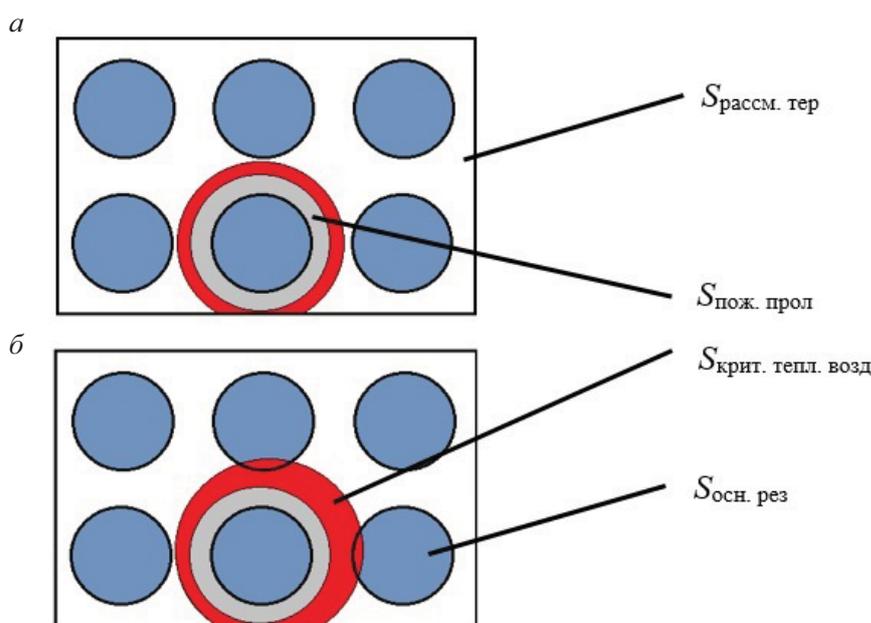


Рис. 3. Расчетная схема оценки вероятности образования эффекта BLEVE в резервуарном парке (объяснение в тексте)

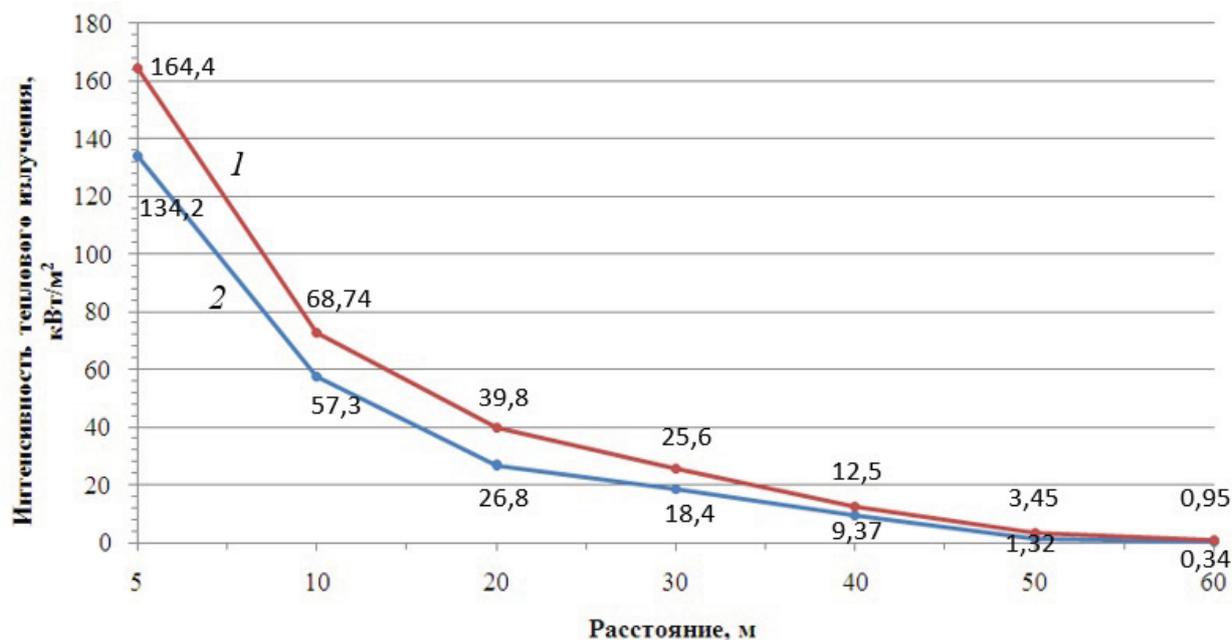


Рис. 4. Зависимость интенсивности теплового излучения от расстояния от геометрического центра пролива [8, 10]:

1 – интенсивность теплового излучения, определенная на основании Приказа МЧС № 649;  
2 – интенсивность теплового излучения по ГОСТ 12.3.047–2012

для дальнейшей оценки вероятности возникновения эффекта BLEVE целесообразно использовать именно последнюю методику.

Исходя из зависимости интенсивности теплового излучения от расстояния от геометрического центра пролива, имеется возможность определить интенсивность в заданной точке. Следующим шагом предполагаемого подхода будет расчет температуры в заданной точке рассматриваемого резервуара по полученному значению интенсивности (рис. 4). Произвести его позволяет закон Стефана–Больцмана:

$$T = \sqrt[4]{\frac{J_{\text{задан}}}{\sigma}},$$

где  $J_{\text{задан}}$  – интенсивность теплового излучения в данный момент в заданной точке, Вт/м<sup>2</sup>;  $\sigma$  – постоянная Стефана–Больцмана ( $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>));  $T$  – температура, К. Полученную температуру необходимо сравнить с допустимым (критическим) значением температуры для материала, из которого изготовлен резервуар, при этом его конструкция не сможет

выдержать нагрузку, что приведет к разгерметизации и разрушению резервуара. Допустимая величина температуры будет соответствовать значению интенсивности, превышение которого вызывает разрушение резервуара ( $J = J_{\text{доп}}$ ).

Для более обоснованного анализа воздействия теплового потока на резервуар и исследования возможности возникновения эффекта BLEVE необходимо количественно оценить время достижения стенкой температуры падения предела прочности, а бензином внутри резервуара – температуры кипения.

Устойчивость металлических конструкций в условиях стандартного пожара обусловлена способностью металла сохранять свои свойства в течение определенного промежутка времени при воздействии пламени. Оценка устойчивости при прочих равных условиях осуществляется исходя из отношения площади сечения к обогреваемой части периметра сечения – приведенной толщины металла. Например, приведенная толщина ( $\sigma_{\text{рез}}$ ) для резервуара РВС-400 рассчитывается по формуле

$$\sigma_{\text{рез}} = \frac{A}{U},$$

в которой  $A$  – площадь сечения металлического элемента, мм<sup>2</sup>;  $U$  – обогреваемая часть периметра сечения, мм.

С учетом габаритных размеров резервуара, а также того факта, что он находится непосредственно в очаге пожара, приведенная толщина равна

$$\delta_{\text{рез}} = \frac{\pi \cdot r_{\text{наруж}}^2 - \pi \cdot r_{\text{внутр}}^2}{2 \cdot \pi \cdot r_{\text{наруж}}} = 5 \text{ мм.}$$

Критическая температура падения предела прочности для материала резервуара (сталь ВСтЗпс5) составляет 650 °С. Время достижения металлом критической температуры при толщине в 5 мм определяется из рис. 5.

На нем видно, что материал стенки резервуара достигнет критической температуры в условиях стандартного пожара через 12 мин.

Для оценки продолжительности нагрева бензина в резервуаре необходимо рассчитать количество энергии, затрачиваемой на повышение температуры бензина до значения кипения:

$$Q_1 = m_1 \cdot c \cdot \Delta t,$$

где  $Q_1$  – количество энергии, необходимое для нагрева бензина, Дж;  $m_1$  – количество бензина в резервуаре ( $m_1 = 300\,000$  кг);  $c$  – удельная теплоемкость бензина ( $c = 2090$  Дж/кг·°С);  $\Delta t$  – изменение температуры ( $t = t_{\text{кип}} - t_{\text{окр.ср}} = 34$  °С).

Исходя из расчета, получаем, что  $Q_1 = 21\,318$  МДж.

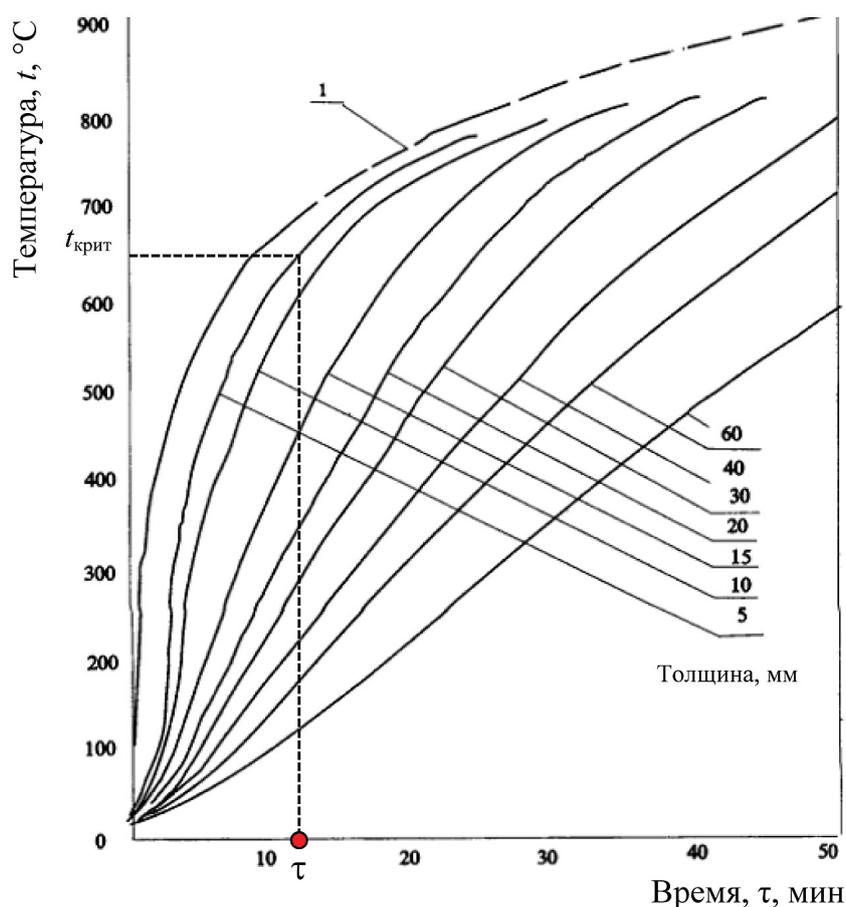


Рис. 5. Номограмма оценки устойчивости металлических конструкций в очаге пожара [11]

Оценка времени нагрева содержимого резервуара до температуры кипения проводится двумя способами. Первый основан на применении расчетного значения интенсивности теплового излучения с учетом площади поглощающей поверхности резервуара:

$$\tau = \frac{Q_1}{J_{\text{задан}} \cdot S},$$

здесь  $J_{\text{задан}}$  – интенсивность теплового излучения в данный момент в заданной точке, Вт/м<sup>2</sup>;  $S$  – площадь поглощающей поверхности резервуара, м<sup>2</sup>.

Площадь  $S$  складывается из площади поверхности стенок и крыши резервуара:

$$S = \pi \cdot r^2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h.$$

Если площадь поглощающей поверхности резервуара равна 265 м<sup>2</sup>, тогда время достижения бензином температуры кипения составит 24,9 мин.

Преимуществами такого метода являются сравнительная точность и направленность, поскольку учитывается значение теплового потока, воздействующего непосредственно на резервуар. Однако для жидкостей основной путь теплопередачи – конвекция, а в данном методе не учитываются процессы массообмена в нагреваемой жидкости.

Второй метод основан на законе сохранения энергии для процессов теплообмена

$$Q_1 = Q_2,$$

$$m_1 \cdot c \cdot \Delta t = m_2 \cdot q,$$

где  $Q_1$  – количество энергии, поглощаемое бензином, Дж;  $Q_2$  – количество энергии, получаемое от пожара пролива, Дж;  $m_2$  – количество горящего бензина, кг;  $q$  – удельная теплота сгорания бензина ( $q = 46\,000$  кДж/кг).

В этой связи можно вычислить количество бензина, сгорания которого достаточно для нагрева содержимого резервуара до темпера-

туры кипения (в адиабатических условиях), по формуле

$$m_2 = \frac{m_1 \cdot c \cdot \Delta t}{q}.$$

Оно составит 463,4 кг.

Таким образом, время, за которое сгорит полученное количество бензина с площади пожара вокруг резервуара шириной 1 м, с учетом массовой скорости выгорания ( $m^*$ ) будет равно

$$\tau = \frac{m_2}{S \cdot m^*} = 8,3 \text{ мин.}$$

Преимуществом данного метода является учет всех путей теплообмена – теплопередачи, излучения и конвекции. Однако найденное значение времени является оценочным и в реальных условиях пожара возрастет, поскольку часть энергии горения бензина идет на нагрев окружающей среды.

На рис. 6 приведены результаты экспериментального и теоретического исследований воздействия температуры поверхности стенки резервуара, контактирующей с жидкостью (2), и несмоченной стенки резервуара (1) при воздействии на него теплового потока открытого пламени температурой 750 °С [12].

Как видно, критическая температура, при которой происходит разрушение конструкции вследствие тепловых деформаций и потери несущей способности металла в 650 °С ( $t_{\text{крит}}$ ), достигается через 6 мин, что согласуется с рассчитанными ранее оценочными данными.

Имея полученные вероятности  $P_{\text{мест}}$  и  $P_{\text{разр}}$ , можно определить вероятность возникновения эффекта BLEVE ( $P$ ):

$$P = P_{\text{мест}} \cdot P_{\text{разр}} = \frac{\sum_{i=1}^n S_{\text{осн.рез}}}{S_{\text{рассм.тер}}} \cdot \frac{S_{\text{крит.тепл.возд}}}{S_{\text{рассм.тер}}} \cdot P_{\text{разр}}.$$

С помощью величины  $P$  можно оперативно и точно оценить влияние эффекта BLEVE и

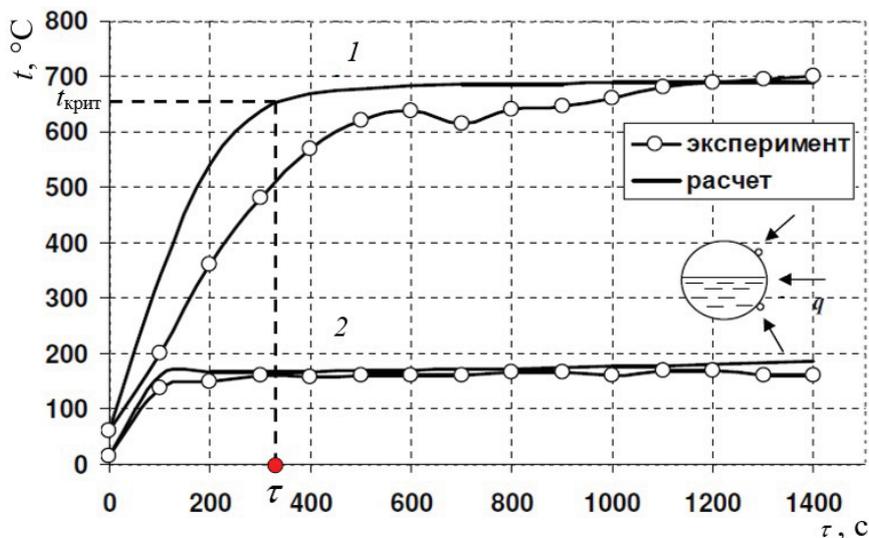


Рис. 6. Зависимость температуры ( $t$ ) от времени нагрева ( $\tau$ ) тепловым потоком ( $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

его последствия при авариях в резервуарных парках.

Таким образом, возникновение эффекта BLEVE – один из наихудших сценариев развития аварии в резервуарных парках, поэтому эффективная оценка данного эффекта, а также прогнозирование его последствий являются неотъемлемой частью при оценке рисков в области пожарной безопасности.

Статья продолжает исследование, основные положения которого опубликованы в материалах конференции «Экология–2018» [13].

### Библиографический список

1. Резервуары для хранения нефти. Резервуарные парки. – URL : <http://refleader.ru/jgeotrnaqas.html> (дата обращения : 30.03.2018).
2. Радоуцкий В. Ю. Опасные технологии производства / В. Ю. Радоуцкий. – Белгород : Изд-во БГТУ, 2008. – 202 с.
3. Guidelines for evaluating the characteristics of vapor cloud explosions, flash fires, and BLEVES. – New York : American Institute of Chemical Engineers, 1994. – 8 p.
4. Данигелка П. Анализ и менеджмент рисков : общая часть / П. Данигелка. – Чешская Республика ; Молдавия : ВШБ, Технич. ун-т Острава, 2015. – 52 с.
5. Пожар и взрыв на ЛПДС «Конда». – URL : <http://travmatizma.net/pozhar-i-vzryv-na-lpds-konda> (дата обращения : 30.03.2018).
6. ГОСТ Р 54141–2010. Менеджмент рисков. Руководство по применению организационных мер безопасности и оценки рисков. Эталонные сценарии инцидентов. – Введ. 2010-21-12. – М. : Изд-во стандартов, 2010. – № 890-ст. – 20 с.
7. Тараканов Д. А. Эффект BLEVE при авариях в резервуарных парках / Д. А. Тараканов, Дм. А. Тараканов, А. Н. Елизарьев // Студенческий науч. форум : материалы XI Междунар. студенческой науч. конференции. – URL : <https://scienceforum.ru/2019/article/2018013056> (дата обращения : 30.03.2018).
8. ГОСТ Р 12.3.047–2012. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. – Введ. 2012-27-12. – М. : Изд-во стандартов, 1998. – 86 с.
9. Елизарьев А. Н. Развитие методических основ оценки риска ЧС в резервуарных парках с использованием методов системного анализа / А. Н. Елизарьев, С. Г. Аксенов, Г. М. Манякова, Р. Р. Габдулхаков, Л. Ю. Кияшко, В. В. Акшенцев // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 2. – С. 131–136.
10. Приказ МЧС РФ от 14 декабря 2010 г. № 649 «Об утверждении методики определения расчетных

величин пожарного риска на производственных объектах» (Зарегистрировано в Минюсте РФ 17 августа 2009 г.) // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2009. – № 14. – Ст. 1656.

11. Методы расчета температурного режима пожара в помещениях зданий различного назначения. – URL : <http://docs.cntd.ru/document/1200103332> (дата обращения : 02.04.2018).

12. Хабибуллин Р. Ш. Устойчивость к воздействию тепловых потоков горизонтальных резервуаров с нефтепродуктом : автореф. дис. ... канд. техн. наук, специальность : 05.26.03. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2010. – 162 с.

13. Тараканов Дм. А. Прогнозирование эффекта BLEVE при авариях в резервуарных парках / Дм. А. Тараканов, Д. А. Тараканов, В. М. Гапонов, А. Н. Елизарьев // Наука, образование, производство в решении экологических проблем (Экология–2018) : материалы XIV Междунар. науч.-технич. конференции : в 2 т. – Уфа : РИК УГАТУ, 2018. – С. 67–77. – URL : [https://ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El\\_izd/ecologia-2018-1.pdf](https://ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/ecologia-2018-1.pdf) (дата обращения : 30.03.2018).

## References

1. *Rezervuary dlia khraneniia nefii. Rezervuarnye parki [Oil storage tanks. Tank farms]*. URL: <http://refleader.ru/jgeotrnaqas.html> (accessed: 30.03.2018). (In Russian)

2. Radoutsii V. Yu. *Opasnye tekhnologii proizvodstva [Dangerous manufacturing technologies]*. Ed. by V. Yu. Radoutsii. Belgorod, Shukhov Belgorod State Technological University Publ., 2008, 202 p. (In Russian)

3. *Guidelines for evaluating the characteristics of vapor cloud explosions, flash fires, and BLEVEs*. New York, American Institute of Chemical Engineers Publ., 1994, 8 p.

4. Danigelka P. [Danigelka P.] *Analiz i management riskov. Obshchaia chast' [Assessment and management of risks. General part]*. Czech Republic and Moldova, VSB – Technical University of Ostrava Publ., 2015, 52 p. (In Russian)

5. *Pozhar i vrzyv na LDPS "Konda" [Fire and explosion at the Konda pipeline remote pumping*

*station]*. URL: <http://travmatizma.net/pozhar-i-vzryv-na-lpds-konda> (accessed: 03.03.2018). (In Russian)

6. *GOST R 54141–2010. Menedzhment riskov. Ru-kovodstvo po primeneniiu organizatsionnykh mer bezopasnosti i otsenki riskov. Etalonnnye stsennarii intsidentov [State standard GOST R 54141–2010. Risk management. Guidance for implementation of organisational measures in security and risk assessment. Reference scenarios of incidents]*. Introduced 21.12.2010. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 2010, no. 890-st, 20 p. (In Russian)

7. *Opasnye proizvodstvennye faktory [Hazardous production factors]*. URL: [https://vuzlit.ru/138019/kakoe\\_oborudovanie\\_vashem\\_predpriyatii\\_rabotaet\\_davleniem\\_nazovite\\_osnovnye\\_prichiny\\_vzryvov\\_sosudov](https://vuzlit.ru/138019/kakoe_oborudovanie_vashem_predpriyatii_rabotaet_davleniem_nazovite_osnovnye_prichiny_vzryvov_sosudov) (accessed: 30.03.2018). (In Russian)

8. *GOST R 12.3.047–2012. Sistema standartov bezopasnosti truda. Pozharnaia bezopasnost' tekhnologicheskikh protsessov. Obshchie trebovaniia. Metody kontroliia [State standard GOST R 12.3.047–2012. System of work safety standards. Fire safety of technological processes. General requirements. Control methods]*. Introduced 27.12.2012. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1998, 86 p. (In Russian)

9. Elizar'ev A. N., Aksenov S. G., Maniakova G. M., Gabdulkhakov R. R., Kiiashko L. Iu. & Akshentsev V. V. *Razvitie metodicheskikh osnov otsenki riska ChS v rezervuarnykh parkakh s ispol'zovaniem metodov sistemnogo analiza [Development of basic procedures in risk assessment of emergency situations in tank farms with application of systemic analysis methods]. Uspekhi sovremennogo estestvoznaniia [Advances of modern natural sciences]*, 2016, no. 2, pp. 131–136. (In Russian)

10. *Ob utverzhdenii metodiki opredeleniia raschetnykh velichin pozharnogo riska na proizvodstvennykh ob'ektakh [On approval of a method for determination of calculated fire risk values in production facilities]*. Order of the Russian Federation Emergencies Ministry no. 649 dated 14.12.2009, registered by the Justice Ministry of RF on 17.08.2009, no. 14, article 1656. (In Russian)

11. *Metody rascheta temperaturnogo rezhima pozhara v pomeshcheniakh zdaniy razlichnogo naznacheniia [Methods for calculation of thermal regime of fire in premises of buildings of different purposes]*.

URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200103332> (accessed: 02.04.2018). (In Russian)

12. Khabibullin R. Sh. *Ustoichivost' k vozdeistviu teplovykh potokov gorizonta'nykh rezervuarov s nefteproduktom* [Resistance to impact from thermal flux in horizontal tanks containing oil products]. Cand. Sci. Eng. diss., speciality: 05.26.03. Moscow, Academy of GPS MChS Russian Federation, 2010, 162 p. (In Russian)

13. Tarakanov Dm. A., Tarakanov D. A., Gaponov V.M. & Elizar'ev A. N. Prognozirovanie effekta BLEVE pri avariakh v rezervuarnykh parkakh [Fore-

casting BLEVE effect in disasters at tank farms]. *Nauka, obrazovanie, proizvodstvo v rezhnii ekologicheskikh problem (Ekologiya-2018). Materialy XIV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konferencii* [Science, education, industry in solving environmental problems (Ecology-2018). Proc. of the 14<sup>th</sup> Intern. sci. and eng. conference]. 2 vols. Ufa, Ufa State Technical University's editorial and publishing complex Publ., 2018, pp. 67-77. URL: [https://ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El\\_izd/ekologiya-2018-1.pdf](https://ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/ekologiya-2018-1.pdf) (accessed: 30.03.2018). (In Russian)

ЕЛИЗАРЬЕВ Алексей Николаевич – канд. геогр. наук, доцент, [elizariiev@mail.ru](mailto:elizariiev@mail.ru) (Уфимский государственный авиационный технический университет); \*АХТЯМОВ Расул Гумерович – канд. техн. наук, доцент, [ahtamov\\_zchs@mail.ru](mailto:ahtamov_zchs@mail.ru) (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); КИСЕЛЕВА Марина Аркадьевна – старший преподаватель, [kismarina63@gmail.com](mailto:kismarina63@gmail.com); ТАРАКАНОВ Денис Анатольевич – студент, [tarakanov021098@gmail.com](mailto:tarakanov021098@gmail.com); ТАРАКАНОВ Дмитрий Анатольевич – студент, [tarakanovdima11@gmail.com](mailto:tarakanovdima11@gmail.com); ЯКОВЛЕВ Даниил Олегович – студент, [fatoom82@mail.ru](mailto:fatoom82@mail.ru); МИХАЙЛОВ Павел Александрович – студент, [linogi@mail.ru](mailto:linogi@mail.ru) (Уфимский государственный авиационный технический университет)