

ISSN 1815-9265

ВЕСТНИК

Сибирского государственного
университета путей сообщения

№ 4 (63). 2022 (161)



УЧРЕДИТЕЛЬ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»

Состав редколлегии

Главный редактор

Манаков Алексей Леонидович – д-р техн. наук, доц.

Заместитель главного редактора

Абрамов Андрей Дмитриевич – д-р техн. наук, доц.

Заместитель главного редактора

Карасев Сергей Владимирович – канд. техн. наук, доц.

Ответственный секретарь

Галай Марина Сергеевна – канд. техн. наук

Члены редколлегии:

Бессоненко Сергей Анатольевич – д-р техн. наук, доц., СГУПС, г. Новосибирск

Воробьев Валерий Степанович – д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск

Герасимов Сергей Иванович – д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск

Герасимов Виталий Владимирович – д-р техн. наук, проф., НГАСУ (Сибстрин), г. Новосибирск

Головнич Александр Константинович – д-р техн. наук, доц., БелГУТ, г. Гомель, Белоруссия

Евсеев Дмитрий Геннадьевич – д-р техн. наук, проф., МИИТ, г. Москва

Ильиных Андрей Степанович – д-р техн. наук, доц., СГУПС, г. Новосибирск

Исаков Александр Леонидович – д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск

Караулов Александр Михайлович – д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск

Карпущенко Николай Иванович – д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск

Комаров Константин Леонидович – д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск

Кондратьев Сергей Александрович – д-р техн. наук, ИГД СО РАН, г. Новосибирск

Королев Константин Валерьевич – д-р техн. наук, доц., СГУПС, г. Новосибирск

Корягин Марк Евгеньевич – д-р техн. наук, доц., СГУПС, г. Новосибирск

Пронозин Яков Александрович – д-р техн. наук, проф., ТИУ, г. Тюмень

Хабаров Валерий Иванович – д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск

Шахов Сергей Александрович – д-р техн. наук, доц., СГУПС, г. Новосибирск

Шварцфельд Вячеслав Семенович – д-р техн. наук, проф., ПГУПС, г. Санкт-Петербург

Черный Константин Анатольевич – д-р техн. наук, доц., ПНИПУ, г. Пермь

Редактор перевода текста на английский язык

Степачкова Ирина Игоревна – старший преподаватель

Редакторы: *Е. Е. Рыжкова, А. О. Елесина, Ю. В. Печенкина*

Корректор *Б. В. Устинов* – канд. техн. наук

Макет, верстка *Ю. В. Борцовой*

Дизайн обложки *А. С. Петренко*

Сайт журнала:

www.stu.ru (раздел «Научная деятельность»; журнал «Вестник СГУПС»)

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-79268 от 02 ноября 2020 г.

FOUNDER

The Siberian Transport University

Editors and Editorial Board

Editor-in-Chief

A. L. Manakov, Doctor of Engineering, Associate Professor

Deputy Editor

A. D. Abramov, Doctor of Engineering, Associate Professor

Deputy Editor

S. V. Karasev, Candidate of Engineering, Associate Professor

Executive Secretary

M. S. Galay, Candidate of Engineering

Editors

S. A. Bessonenko, Doctor of Engineering, Associate Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

V. S. Vorobyev, Doctor of Engineering, Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

S. I. Gerasimov, Doctor of Engineering, Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

V. V. Gerasimov, Doctor of Engineering, Professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk

A. K. Golovnich, Doctor of Engineering, Associate Professor, Belarusian State University of Transport, Belarus

D. G. Evseev, Doctor of Engineering, Professor, Moscow State University of Railway Engineering, Moscow

A. S. Ilinykh, Doctor of Engineering, Associate Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

A. L. Isakov, Doctor of Engineering, Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

A. M. Karaulov, Doctor of Engineering, Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

N. I. Karpuschenko, Doctor of Engineering, Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

K. L. Komarov, Doctor of Engineering, Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

S. A. Kondratyev, Doctor of Engineering, IGD SB RAS, Novosibirsk

K. V. Korolev, Doctor of Engineering, Associate Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

M. E. Koryagin, Doctor of Engineering, Associate Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

Y. A. Pronozin, Doctor of Engineering, Professor, TIU, Tyumen

V. I. Khabarov, Doctor of Engineering, Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

S. A. Shakhov, Doctor of Engineering, Associate Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

V. S. Shvartsfeld, Doctor of Engineering, Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg

K. A. Chernyi, Doctor of Engineering, Associate Professor, Perm National Research Polytechnic University, Perm

English Text Reviewer

I. I. Stepachkova, Senior Lecturer

Text Reviewers **E. E. Ryzhkova**, **A. O. Elesina**, **Yu. V. Pechenkina**

Managing Editor **B. V. Ustinov**, Candidate of Engineering

Layout Designer **Yu. V. Bortsova**

Cover Designer **A. S. Petrenko**

Main contact details

Siberian Transport University
room 307, 191, Dusi Kovalchuk St.
630049, Novosibirsk, Russia
Phone: (383) 328-04-36
Web: <http://www.stu.ru> (Scientific Activity section)
E-mail: vestnik.stu@yandex.ru

The journal was registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media in 2020.

ISSN: 1815-9265

Включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук и на соискание ученой степени доктора наук, по группам научных специальностей 05.22.00 «Транспорт» и 05.23.00 «Строительство и архитектура», а также по специальности 05.02.22 «Организация производства (в отраслях транспорта)»

№ 4 (63) · 2022 · ОКТЯБРЬ – ДЕКАБРЬ · 16+

Выходит один раз в три месяца. Основан в 1999 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Транспорт

<i>Король Р. Г.</i> Организация сетевого взаимодействия приграничных терминалов-спутников для обслуживания внешнеторговых грузопотоков Дальневосточного региона	5
<i>Черняк А. Р., Карасев С. В.</i> Особенности путевого развития специализированных железнодорожных линий для обеспечения бесшовных технологий перевозки тяжеловесных грузов	15
<i>Белоголов Ю. И., Гозбенко В. Е.</i> Моделирование поездопотоков на участке Усть-Илимск – Хребтовая с целью увеличения пропускной способности	28
<i>Парахненко И. Л., Гребнева Д. А.</i> Моделирование пятна контакта, возникающего при взаимодействии колеса и рельса, для разных вариантов режима ведения грузового состава	36
<i>Власова Н. В., Оленевич В. А.</i> Декомпозиция основных бизнес-процессов и зоны формирования рисков железнодорожной транспортной системы в сфере грузовых перевозок	44
<i>Псеровская Е. Д., Овчинников Р. А.</i> Исследование влияния формы поверхности навалочных грузов на выдувание при транспортировке	53
<i>Бессоненко С. А., Гунбин А. А., Климов А. А.</i> Исследование основного удельного сопротивления движению отцепов при скатывании с сортировочной горки на основе натурных наблюдений	62

Строительство и архитектура

<i>Макаров В. А.</i> Климатическая камера для проведения испытаний на стойкость к переменному давлению при заданных температурных режимах	69
<i>Глушков С. П., Кочергин В. И., Проворная Д. А.</i> Снижение колебаний мостовых сооружений	77
<i>Новоселов А. А., Пичкурова Н. С.</i> Анализ расчета стальных конструкций ЛЭП по современным нормативно-техническим документам	86
<i>Исаков А. Л., Гудкова И. Н., Жураева Б. С.</i> Влияние учета солнечной радиации на результаты теплотехнических расчетов земляного полотна железнодорожного пути	94
<i>Воробьев В. С., Карелина Е. Л., Репина И. Б.</i> Мониторинг несущей способности основной площадки земляного полотна автомобильных дорог в зоне расположения водопропускных труб	106
<i>Герасимов С. И., Галкина А. И., Гришан И. А., Бобкова Е. Ю.</i> Количественный мониторинг электронного инженерного образования в области транспортного строительства	114

The Siberian TransportA scientific journal

University

Bulletin

Included in the List of peer-reviewed scientific publications in which the main scientific results of candidate's thesis and doctoral thesis should be published in scientifically oriented groups 05.22.00 "Transport" and 05.23.00 "Construction and Architecture", as well as in the speciality 05.02.22 "Industrial engineering (in transport industry)"

№ 4 (63), 2022 October – December 16+

Issued quarterly. Established in 1999

CONTENTS

Transport

- R. G. Korol.* Network interaction organization of cross-border satellite terminals for servicing foreign trade cargo flows of the Far Eastern region5
- A. R. Chernyak, S. V. Karasev.* Features of specialized railway lines track development to ensure seamless technologies for the heavy cargo transportation15
- Yu. I. Belogolov, V. E. Gozbenko.* Simulation of train flows on the section Ust-Ilimsk – Khrebtovaya to increase throughput28
- I. L. Parakhnenko, D. A. Grebneva.* Modeling of the contact spot arising from the interaction of a wheel and a rail, for different variants of the mode of the freight train driving mode36
- N. V. Vlasova, V. A. Olentsevich.* Decomposition of the main business processes and the risk formation zone of the railway transport system in the field of freight traffic44
- E. D. Pserovskaya, R. A. Ovchinnikov.* Influence investigation of bulk cargo surface shape on blowing during transportation53
- S. A. Bessonenko, A. A. Gunbin, A. A. Klimov.* Investigation of the main specific resistance to the movement of cuts when rolling down a gravity hump based on field observations62

Building and Architecture

- V. A. Makarov.* Climatic chamber for testing resistance to variable pressure at specified temperature conditions69
- S. P. Glushkov, V. I. Kochergin, D. A. Provornaya.* Reduction of vertical acceleration bridge structure77
- A. A. Novoselov, N. S. Pichkurova.* Computational analysis of power transmission line steel structures according to modern regulatory and technical documents86
- A. L. Isakov, I. N. Gudkova, B. S. Zhuraeva.* Influence of accounting for solar radiation on the results of thermal engineering calculations of the railway track subgrade94
- V. S. Vorobyev, E. L. Karelina, I. B. Repina.* Monitoring of the roadbed main site bearing capacity in the area of culverts106
- S. I. Gerasimov, A. I. Galkina, I. A. Grishan, E. Yu. Bobkova.* Quantitative monitoring of e-engineering education in the field of transport construction114

ТРАНСПОРТ

Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 4 (63). С. 5–14.
The Siberian Transport University Bulletin. 2022. No. 4 (63). P. 5–14.

ТРАНСПОРТ

Научная статья
УДК 656.078.1
doi 10.52170/1815-9265_2022_63_5

Организация сетевого взаимодействия приграничных терминалов-сателлитов для обслуживания внешнеторговых грузопотоков Дальневосточного региона

Роман Григорьевич Король

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия, Kingkhv27@mail.ru

Аннотация. В июне 2022 г. на Петербургском международном экономическом форуме обсуждался вопрос организации национальной логистической системы, включающей транспортную и терминально-логистическую инфраструктуру, транспортные средства, контейнерное оборудование, морские суда и т. д. Евразийский союз участников железнодорожных грузовых перевозок предлагает пересмотреть программу создания опорной сети транспортно-логистических центров на территории России с учетом переориентации грузопотоков на восточное направление. В условиях ограничения пропускной способности портовой инфраструктуры необходимо строительство тыловых терминалов типа «сухой порт» и модернизации пограничных пунктов пропуска Восточного полигона железных дорог. Организация в Дальневосточном регионе сети приграничных терминалов-сателлитов, которые технологически будут связаны с терминально-логистическими центрами транспортных узлов, позволит минимизировать дефицит пропускной способности пограничных пунктов пропуска и повысить качество транспортного обслуживания. Приграничные терминалы-сателлиты, созданные на базе грузовых терминалов Дальневосточной железной дороги, способны образовать вспомогательную терминальную сеть для эффективного пропуска внешнеторговых грузов в рамках транспортных коридоров «Приморье-1» и «Приморье-2», а также перспективных международных маршрутов в направлении стран Азиатско-Тихоокеанского региона.

Целью работы является разработка экономико-технологических решений по организации сети приграничных терминалов-сателлитов на Восточном полигоне железных дорог для обработки дополнительного грузопотока и повышения качества транспортного обслуживания. В данной работе использованы теоретические методы исследования, включая системный анализ и синтез информации. В статье была разработана каркасная схема расположения приграничных терминалов-сателлитов на Дальнем Востоке и представлена схема информационного взаимодействия участников транспортного процесса при организации внешнеторговых перевозок грузов через сеть терминалов-сателлитов. Эффективность создания сети приграничных терминалов-сателлитов будет заключаться в увеличении прибыли за счет привлечения дополнительных объемов грузопотоков и оптимизации загрузки терминально-логистической и транспортной инфраструктуры приграничных регионов.

Ключевые слова: терминально-логистическая инфраструктура, пограничные пункты пропуска, терминалы-сателлиты

Для цитирования: Король Р. Г. Организация сетевого взаимодействия приграничных терминалов-сателлитов для обслуживания внешнеторговых грузопотоков Дальневосточного региона // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 4 (63). С. 5–14. DOI 10.52170/1815-9265_2022_63_5.

TRANSPORT

Original article

Network interaction organization of cross-border satellite terminals for servicing foreign trade cargo flows of the Far Eastern region

Roman G. Korol

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia, Kingkhv27@mail.ru

Abstract. In June 2022, at the St. Petersburg International Economic Forum, the issue of organizing a national logistics system was discussed, including transport and terminal logistics infrastructure, vehicles, container equipment, ships, etc. The Eurasian Union of Participants in Rail Freight Transportation proposes to revise the program for creating a backbone network of transport and logistics centers in Russia, taking into account the reorientation of cargo flows to the east. In the context of the port infrastructure limited capacity, it is necessary to build rear terminals of the dry port type and modernize the border checkpoints of the Eastern range of railways. The organization of a network of border satellite terminals in the Far East region, which will be technologically connected with terminal and logistics centers of transport hubs, will minimize the shortage of capacity at border checkpoints and improve the quality of transport services. The satellite border terminals, created on the basis of the freight terminals of the Far Eastern Railway, are able to form an auxiliary terminal network for the effective passage of foreign trade cargo within the transport corridors Primorye-1 and Primorye-2, as well as promising international routes in the direction of the countries of Asia-Pacific region.

The aim of the work is to develop economic and technological solutions for organizing a network of satellite border terminals at the Eastern Railway Range to handle additional freight traffic and improve the quality of transport services. This paper uses theoretical research methods, including system analysis and information synthesis. The article developed a wireframe diagram of the location of border satellite terminals in the Far East and presented a diagram of the information interaction of participants in the transport process when organizing foreign trade transportation of goods through a network of satellite terminals. The creating effectiveness of border satellite terminals network will be to increase profits by attracting additional volumes of cargo flows and optimizing the loading of the terminal, logistics and transport infrastructure of the border regions.

Keywords: terminal and logistics infrastructure, border checkpoints, satellite terminals

For citation: Korol R. G. Network interaction organization of cross-border satellite terminals for servicing foreign trade cargo flows of the Far Eastern region. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(63):5–14. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_63_5.

Введение

Сложившаяся геоэкономическая ситуация перестроила транспортно-логистические цепочки доставки товаров, переориентируя грузопотоки на восточные транспортные маршруты. Терминально-логистическая инфраструктура дальневосточных морских портов имеет ограничения перерабатывающей способности, дисбаланс экспортных и импортных грузопотоков приводит к недостатку транспортных средств и оборудования. Отсутствие резервов пропускной способности транспортной инфраструктуры мультимодальных узлов и на подходах к пунктам перевалки, а также наличие нерешенных организационных, технологических, правовых и информационных вопросов сказываются на эффективности функционирования дальневосточного транспортного комплекса, подсистемы которого должны сегодня обеспечить пропуск поступающего грузопотока. Появление крупных логистических операторов Китая вместо ушедших с российского транспортного рынка морских трансконтинентальных компаний не обеспечивает необходимый уровень качества транспортного сервиса, они недостаточно интегрированы в российскую транспортную систему для обслуживания увеличивающегося грузо- и контейнеропотока. Поэтому грузоотправители используют альтернативные транспортные маршруты, переключая часть грузопотоков на автомобильный и железнодорожный транспорт, что

увеличит загрузку транспортной сети, включая пограничные пункты пропуска [1].

Вследствие сложного эпидемиологического положения в приграничных регионах Китая образуются очереди из автомобильных транспортных средств, ожидающих пропуска через государственную границу. В результате транспортным компаниям приходится оперативно перенаправлять транспорт на пункты пропуска приграничных регионов Китая, где отсутствуют ограничения, связанные с нераспространением коронавирусной инфекции, что приводит к дополнительной загрузке пунктов пропуска.

Для повышения эффективности осуществления внешнеэкономических перевозок России со странами Азиатско-Тихоокеанского региона актуальной становится задача организации сети приграничных терминалов-сателлитов. На основании письма АО «Институт экономики и развития транспорта» от 02.08.2021 №12-02/202 перспективные объемы перевозок через железнодорожные пункты пропуска (ЖДПП) дальневосточных транспортных коридоров к 2024 г. могут достичь 22,5 млн т (рис. 1).

Для пропуска, обработки и перевозки прогнозных объемов грузопотока необходимо реализовать принципы «бесшовной» логистики, основанные на бесперегрузочных технологиях доставки, прозрачности информационного обмена, увеличении скорости обработки

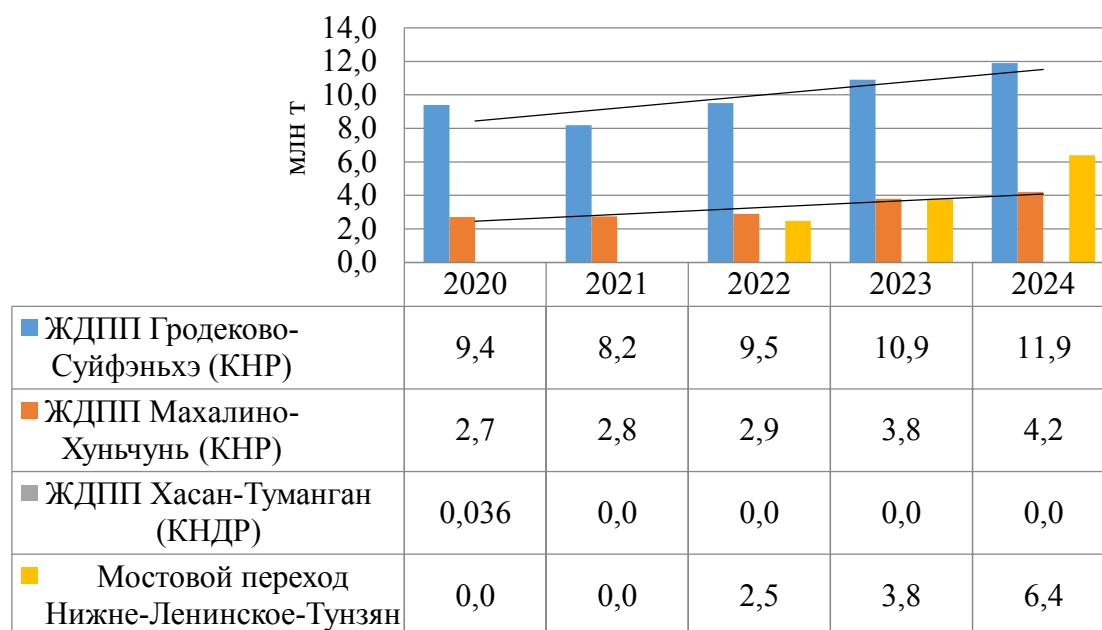


Рис. 1. Перспективные объемы перевозок через дальневосточные железнодорожные пограничные переходы до 2024 г.

данных, минимизации времени выполнения грузовых и таможенных операций, дистанционном отслеживании всех этапов транспортного и документального процесса.

Материалы и методы исследования

При выполнении данной работы использовались теоретические методы исследования: поисковые методы, методы анализа и синтеза.

Существующий уровень развития пограничной транспортной инфраструктуры на российско-китайской границе является сдерживающим фактором при пропуске грузов и транспортных средств. В настоящее время наблюдается дисбаланс загруженности терминально-складских объектов ЖДПП Дальневосточной железной дороги (рис. 2), основной объем переработки внешнеторгового грузопотока приходится на пограничную станцию Гродеково и порядка 10 % – на пограничные станции Камышовая, Махалино и Хасан.

Интенсивные и неравномерные нагрузки на инфраструктуру пунктов пропуска возможно нивелировать путем организации сетевого взаимодействия терминалов-сателлитов в приграничных регионах Дальнего Востока. В «Концепции создания терминально-логистических центров на территории Российской Федерации», разработанной холдингом ОАО

«РЖД» в 2011 г., представлена иерархия объектов терминальной сети, в структуре которой дано определение терминала-сателлита и описание его функциональных характеристик [2]. Географическое расположение дальневосточных регионов, перспективы развития транспортной сети и экономические условия являются основными катализаторами организации сети приграничных терминалов-сателлитов на территории России.

Приграничный терминал-сателлит – это терминально-логистический объект, расположенный в приграничной зоне и технологически связанный с узловым терминально-логистическим центром (ТЛЦ) [3]. Структурные и технологические параметры терминалов типа «сателлит» определяются в зависимости от направленности функционирования, объемов и специфических характеристик местных условий. Терминалы-сателлиты, созданные на базе грузовых терминалов дальневосточной железной дороги и расположенные в приграничных регионах, способны образовать вспомогательную терминальную сеть для преобразования и пропуска внешнеторговых грузов в рамках транспортных коридоров «Приморье-1» и «Приморье-2» [4], а также перспективных международных маршрутов в направлении стран Азиатско-Тихоокеанского региона (рис. 3):

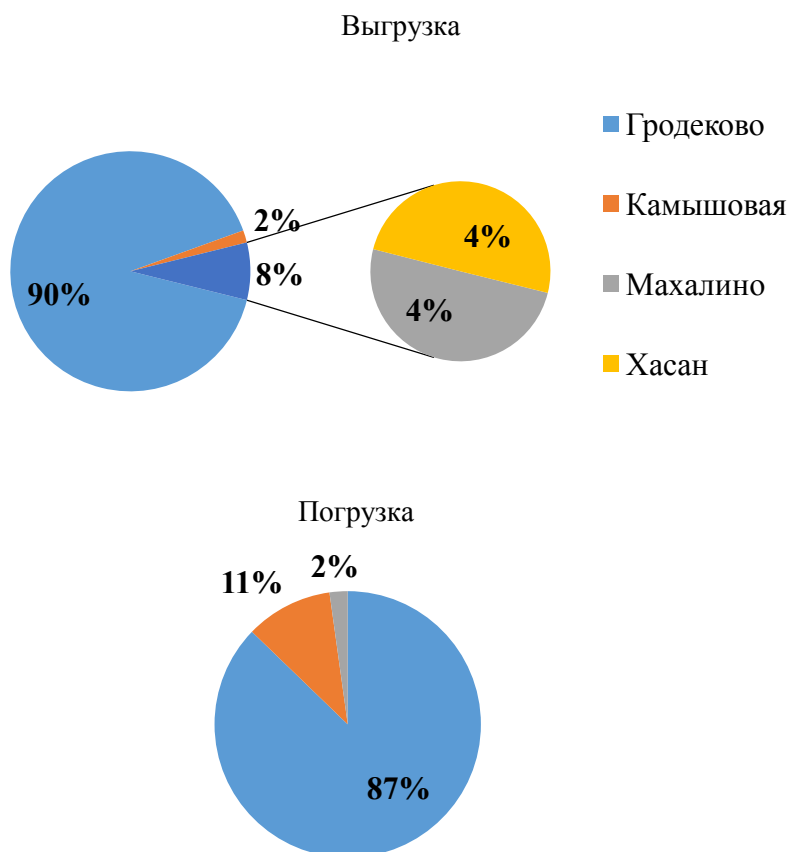


Рис. 2. Соотношение объемов грузовой работы пограничных станций Дальневосточной железной дороги за 2021 г.

– Хабаровский ТЛЦ координирует деятельность терминалов крупных промышленных населенных пунктов (Комсомольск-на-Амуре, Биробиджан) и приграничные терминалы-сателлиты, расположенные в пригороде Хабаровска (смешанные пункты пропуска пос. Красная Речка, Хабаровский речной торговый порт (провинция Хэйлунцзян, КНР), а также терминалы «Нижнеленинское» (Тунзян, КНР) и «Большой Уссурийский» (Фуюань, КНР), которые будут организованы в перспективе при открытии пунктов пропуска;

– Уссурийский ТЛЦ включает систему таможенных терминалов пунктов пропуска «Пограничный» (Суйфэнхэ, КНР) и Махалино (Хуньчунь, КНР) с выходом на транспортные узлы провинции Цзилинь и Чанчунь (КНР), а также терминал железнодорожной станции Хасан для обработки грузов назначением на станцию Туманган (КНДР).

Организация единой системы информационного сопровождения и принятия решений

по управлению движением грузопотока возможна при создании информационно-логистического центра терминальной сети [5]. Информационно-логистический центр может быть организован на базе логистического центра Дальневосточной железной дороги с подключением информационных ресурсов Дальневосточного таможенного управления. Терминалы пунктов пропуска, расположенных в морских портах Ванино, Владивосток, Находка, Зарубино, представляют отдельную технологическую систему транспортных узлов и могут быть интегрированы в единое информационное поле терминально-логистических объектов Дальневосточного региона.

Транспортные логистические цепи могут быть сформированы в зависимости от направления движения грузопотока и совершаемых грузовых операций с товаром, поэтому включают следующие маршруты [6]:

- «терминал – терминал», после проведения таможенных операций и при достаточных

объемах грузопотока, средствами приграничного терминала-спутника осуществляется формирование маршрутного поезда на терминал станции назначения;

• «терминал – ТЛЦ – терминал», приграничный терминал-спутник формирует отдельные группы вагонов для дальнейшей отправки в составе сборного поезда на ТЛЦ, где

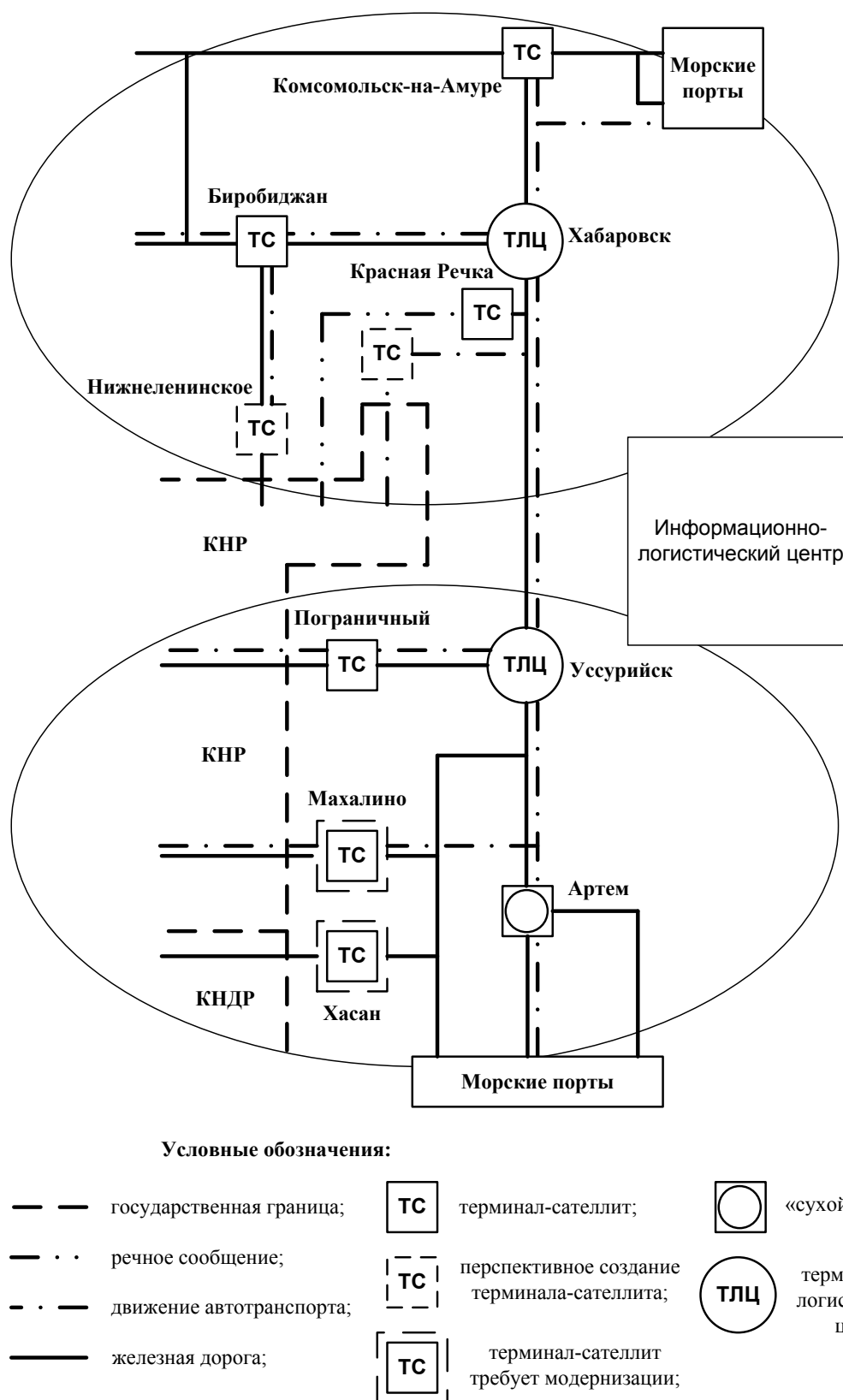


Рис. 3. Каркасная схема расположения приграничных терминалов-спутников на Дальнем Востоке

формируются маршрутные поезда назначением на терминал станции прибытия;

- «терминал – ТЛЦ – ТЛЦ – терминал», приграничный терминал-сателлит передает груз в вагонах или автотранспортом на ТЛЦ, движение магистральных поездов осуществляется между станциями, обслуживающими ТЛЦ, с последующей доставкой груза на терминал-сателлит назначения.

Целесообразно формирование маршрутных контейнерных поездов на путях ТЛЦ [7], который консолидирует контейнеропотоки, поступающие с приграничных терминалов-сателлитов. Терминал-сателлит как удаленный логистический объект ТЛЦ выполняет функции таможенно-транзитных терминалов с оказанием портфеля услуг – информационных, финансовых и правовых. В задачи приграничного терминала-сателлита входит оперативное решение технологических вопросов, ускорение транспортно-логистических, терминальных и таможенных операций с целью повышения качества транспортного обслуживания и оптимизации затрат пользователей транспортных услуг.

Результаты исследования

Эффективность создания сети приграничных терминалов-сателлитов будет заключаться в увеличении прибыли за счет повышения качества транспортного обслуживания $K_{Т-С}^{тр}$, привлечения дополнительных объемов грузопотоков и оптимизации загрузки терминально-логистической и транспортной инфраструктуры приграничных регионов [8, 9]. Качество транспортного обслуживания клиентов представлено в виде комплексного уравнения, включающего неравенства, выполнение которых позволит рассматривать создаваемую сеть приграничных терминалов-сателлитов как экономически и технологически эффективную систему транспортировки внешнеторговых грузов:

$$K_{Т-С}^{тр} = \begin{cases} C_{Т-С}^{дост} \leq C_{сущ}^{дост}; \\ T_{Т-С}^{дост} < T_{сущ}^{дост}; \\ I_{Т-С}^{усл} > I_{сущ}^{усл}, \end{cases}$$

где $C_{Т-С}^{дост}$ – затраты на доставку груза через сеть приграничных терминалов-сателлитов с единым информационно-логистическим центром, усл. ед. / т; $C_{сущ}^{дост}$ – текущие затраты на доставку груза по существующей технологии, усл. ед. / т; $T_{Т-С}^{дост}$ – срок доставки груза через

терминальную сеть, сут; $T_{сущ}^{дост}$ – срок доставки груза в настоящее время, сут; $I_{Т-С}^{усл}$ – уровень информационного сопровождения транспортировки грузов через терминальную сеть, %; $I_{сущ}^{усл}$ – существующий уровень информационного сопровождения транспортировки грузов, %.

При формировании и выборе вариантов международных транспортно-логистических цепей грузоотправители в качестве основных требований выделяют стоимость, время доставки и информационное сопровождение отправки, включая процедуру таможенного оформления. Уровень информационного обслуживания клиентов определяется способностью системы транспортного обслуживания предоставлять грузоотправителям и грузополучателям в реальном режиме времени информацию о дислокации транспортных средств, транспортной тары, складских и таможенных операциях, изменениях условий доставки и т. д. Уровень удовлетворенности клиентов информационным сопровождением транспортно-логистических услуг оценивается с помощью анкетирования, а также проводится оценка достоверности и оперативности предоставляемой информации (общее время, затраченное на подготовку ответа, к числу общих запросов клиента).

Распределение по пограничным пунктам пропуска прогнозных значений объемов грузопотока и требуемого подвижного состава с учетом имеющегося инфраструктурного оснащения и уровня пропускной способности терминалов-сателлитов позволит минимизировать время на пересечение транспортными средствами государственной границы и осуществление грузовых и сопутствующих таможенных операций [10]. Технологическое взаимодействие терминалов-сателлитов с объектами ТЛЦ возможно с помощью железнодорожного и автомобильного транспорта, при этом финансовые затраты грузоотправителя при перевозке в системе «терминал-сателлит – ТЛЦ» не должны превышать текущих издержек при доставке груза в автомобильном или железнодорожно-автомобильном сообщении. Ускорение процесса обработки внешнеторговых грузов на складских объектах терминальной сети возможно достичь за счет современного технического оснащения и оперативного информационного взаимодействия всех участ-

ников транспортного процесса, а также организации транзитного продвижения отправок грузов железнодорожным транспортом с формированием блок-поездов на путях станции, обслуживающей терминал-сателлит, и передачей вагонов на пути ТЛЦ для включения в составы ускоренных магистральных поездов.

Информационно-логистический центр терминальной сети должен стать ключевым звеном между клиентами, перевозчиками и таможенными органами с целью повышения качества транспортного обслуживания клиентов при организации международных перевозок грузов [11] (рис. 4).

Повышение качества транспортного обслуживания грузоотправителей достигается за счет оказания комплекса транспортно-логистических услуг по принципу «одно окно», гибкого подхода к запросам клиента, своевременного решения вопросов, возникших в процессе перевозки груза, современных технологий по учету и отслеживанию груза на всех стадиях транспортировки, высокого уровня сервиса и партнерских взаимоотношений, а также индивидуального подхода к ценообразованию с учетом

направлений движения и объемов грузопотока [11]. Информационно-логистический центр терминальной сети может выполнять функции оператора мультимодальных перевозок, что позволит исключить присутствие грузоотправителя или иного представителя при выполнении таможенных и других операций на приграничном терминале-сателлите.

Помимо экономического эффекта, также следует учитывать внетранспортный эффект от функционирования приграничной терминальной сети с координирующим информационно-логистическим центром, заключающийся в развитии экономического потенциала приграничных регионов за счет увеличения объема экспортно-импортных перевозок грузов через международные транспортные коридоры, налоговых отчислений и привлечения инвестиций, а также в расширении сферы логистической деятельности в регионе и повышении качества предоставляемых транспортно-логистических услуг до международного уровня, в результате чего повышается конкурентоспособность и имидж российской транспортной системы [12].

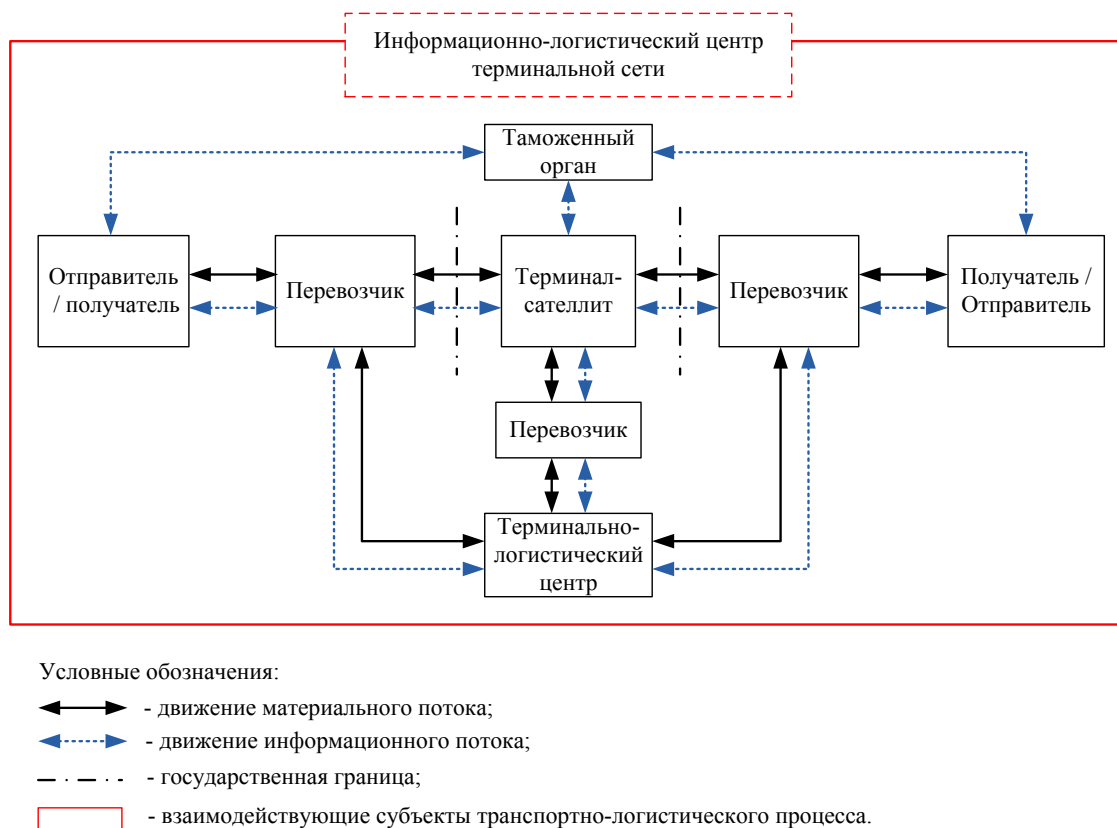


Рис. 4. Схема информационного взаимодействия субъектов транспортного процесса при организации сети терминалов-сателлитов

Выводы

В данной работе рассмотрен вопрос организации приграничной терминальной сети в Дальневосточном регионе путем решения следующих задач:

- описания текущей ситуации в области организации внешнеторговых перевозок и транспортного бизнеса;
- анализа перспективных объемов перевозок грузов через дальневосточные ЖДПП до 2024 г.;
- определения понятия «приграничный терминал-сателлит» как терминально-логистического объекта, расположенного в приграничной зоне и технологически связанного с узловыми ТЛЦ, которые, в свою очередь, расположены в крупных транспортных и промышленных узлах;
- формулирования составляющих эффективности создания сети приграничных терминалов-сателлитов, заключающихся в повышении качества транспортного обслуживания клиентов;
- разработки схемы информационного взаимодействия субъектов транспортного процесса при организации сети терминалов-сателлитов, где координирующей структурой является информационно-логистический центр терминальной сети.

Информационно-логистический центр терминальной сети на основе аналитики статистической и оперативной информации сможет осуществлять регулирование маршрутов движения и количество транспортных средств, перемещаемых и следующих в адрес пограничных пунктов пропуска. Гармонизация пропускной способности пограничных пунктов пропуска и количества поступающего транспорта позволит минимизировать время простоя автомобильных транспортных средств в ожидании таможенных и технологических операций, сбалансировать

нагрузку на терминально-логистические объекты рассматриваемых ЖДПП.

Приграничные терминалы-сателлиты, расположенные около крупных городских агломераций, могут выполнять функции распределительного центра с размещением на территории терминала торгово-выставочной инфраструктуры и организации бизнес-среды [13].

17 июня 2022 г. в рамках проведения Петербургского международного экономического форума было подписано соглашение между Министерством транспорта России, Правительством Приморского края, ОАО «Российские железные дороги», АО «Корпорация развития Дальнего Востока и Арктики» и ООО «Фрейт Вилладж Приморский» о строительстве транспортно-логистического центра площадью 203 га с функцией «сухого порта» для разгрузки морских портов Владивостокского транспортного узла и обработки внешнеторговых грузов, прибывающих автотранспортом из Китая [14]. Размещение транспортно-логистического центра планируется на территории опережающего развития «Михайловский» Приморского края, с примыканием железнодорожных путей к станции Воздвиженский. Транспортно-логистический центр будет включать транспортную инфраструктуру, терминальные и таможенные объекты с перерабатывающей способностью до 300 тыс. контейнеров в год [15].

Транспортно-логистические центры транспортных узлов и приграничные терминалы-сателлиты должны стать информационно-технологическими «буферами» при перемещении внешнеторгового грузопотока через государственную границу, согласовывая параметры грузопотока между таможенными органами участвующих стран с учетом текущей ситуации на пунктах пропуска и производственными возможностями объектов терминальной и транспортной инфраструктуры.

Список источников

1. Король Р. Г. Формирование приграничной терминально-логистической инфраструктуры для организации контрейлерных перевозок на направлении Суйфэньхэ (КНР) – Гродеково (РФ) // Известия Транссиба. 2022. № 1 (49). С. 43–56.
2. Концепция создания терминально-логистических центров // ОАО «РЖД»: официальный сайт. URL: <https://cargo.rzd.ru/ru/10127> (дата обращения: 03.07.2022).
3. Глушак А. С., Король Р. Г. Организация приграничных терминально-логистических центров на Дальневосточной железной дороге // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы Девятой международной научно-практической конференции. Иркутск, 2018. Т. 1. С. 82–87.

4. Тихомиров М. Е. Исследование роли таможенно-логистических терминалов в развитии приграничных регионов России (на примере Курской области) // Вестник Евразийской науки. 2018. Т. 10, № 6. С. 48–58.
5. Зубков В. В., Сирина Н. Ф. Механизм оценки синтеза взаимодействия и интеграции субъектов транспортно-информационного пространства // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2021. № 4 (59). С. 22–30.
6. Korol R. The Decision of Macrologistical Problem of Finding the Optimal Number of Distribution Warehouses in Served Territory // Smart Innovation, Systems and Technologies. 2022. Vol. 275. P. 163–169.
7. Гомбосэд С., Маликов О. Б. Оптимизация расположения контейнеров на приграничных терминалах // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2013. № 2 (35). С. 54–59.
8. Зубков В. В., Сирина Н. Ф., Раевская П. Е. Применение экономико-математической модели при формировании оптимального варианта оптимизации транспортно-логистического процесса // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2020. № 2 (53). С. 30–36.
9. Крутоног Л. Г. Математическая модель оптимизации системы управления таможенного контроля на пограничных терминалах при прохождении контейнерных грузопотоков // Транспорт: наука, техника, управление : научный информационный сборник. 2016. № 4. С. 22–27.
10. Временная параметризация в распределении грузопотоков транспортно-технологических систем / О. Н. Числов, В. А. Богачев, А. С. Кравец, Т. В. Богачев // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2019. № 3 (50). С. 14–22.
11. Шаламова О. А. Практическое применение концепции «точно в срок» в транспортной логистике и ее моделирование // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2017. № 2 (41). С. 22–26.
12. Минакова И. В., Тихомиров М. Е. Основные направления повышения эффективности функционирования таможенно-логистических терминалов в приграничных регионах как фактора их социально-экономического развития // Вестник Евразийской науки. 2019. Т. 11, № 6. С. 39–47.
13. Троицкая Е. А., Король Р. Г. Организация терминала-сателлита для обслуживания промышленных предприятий территорий опережающего развития // Транспорт: наука, образование, производство : сборник научных трудов. Ростов-на-Дону, 2018. С. 79–83.
14. Переориентация и увеличение ж/д грузоперевозок на Восток. Новые правила и товарообмен. Зона комфорта и стабильности : интервью первого заместителя генерального директора ОАО «РЖД» Сергея Павлова // РЖД ТВ : [сайт]. URL: <https://rzd.tv.ru/2022/06/16/sergej-pavlov-pervyj-zamestitel-generalnogo-direktora-ooo-rzhd/> (дата обращения: 02.07.2022).
15. Гигантскую стройку развернут в Приморье в границах ТОР «Михайловский» // РИА «Восток-Медиа» : [сайт]. URL: <https://vostokmedia.com/news/society/20-06-2022/gigantskuyu-stroyku-razvernut-v-primorie-v-granitsah-tor-mihaylovskiy> (дата обращения: 07.07.2022).

References

1. Korol R. G. Formation of the border terminal and logistics infrastructure for the organization of piggyback transportation in the direction of Suifenhe (PRC) – Grodekovo (RF). *Journal of Transsib Railway Studies*. 2022;1(49):43–56. (In Russ.).
2. The concept of creating terminal and logistics centers. *Russian Railways: official website*. (In Russ.). URL: <https://cargo.rzd.ru/ru/10127>.
3. Glushak A. S., Korol R. G. Organization of border terminal and logistics centers on the Far Eastern Railway. *Transport infrastructure of the Siberian region: materials of the Ninth International Scientific and Practical Conference*. Irkutsk, 2018;1:82–87. (In Russ.).
4. Tikhomirov M. E. Study of the role of customs and logistics terminals in the development of Russian border regions (on the example of the Kursk region). *The Eurasian Scientific Journal*. 2018;(6):48. (In Russ.).
5. Zubkov V. V., Sirina N. F. Mechanism for evaluating the synthesis of interaction and integration of transport and information space subjects. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2021;(59):22–30. (In Russ.).
6. Korol R. The Decision of Macrologistical Problem of Finding the Optimal Number of Distribution Warehouses in Served Territory. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2022;275:163–169. (In Russ.).
7. Gombosed S., Malikov O. B. Optimization of containers arrangement at border terminals. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2013;2(35):54–59. (In Russ.).
8. Zubkov V. V., Sirina N. F., Raevskaya P. E. Application of economic-mathematical model in the formation of the optimal option for optimizing the transport and logistics process. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2020;(53):30–36. (In Russ.).

9. Krutonog L. G. Mathematical model for optimization of the management system for customs control at the border terminals during passage of container traffic. *Transport: science, equipment, management (Scientific Information Collection)*. 2016;(4):22–27. (In Russ.).
10. Chislov O. N., Bogachev V. A., Kravets A. S., Bogachev T. V. Time parameterization in the cargo flow distribution of transport and technological systems. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2019;(50):14–22. (In Russ.).
11. Shalamova O. A. Practical application of the “just-in-time” concept in transport logistics and its modeling. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2017;(41):22–26. (In Russ.).
12. Minakova I. V., Tikhomirov M. E. The main directions of improving the customs and logistics terminals functioning in border regions as a factor in their socio-economic development. *The Eurasian Scientific Journal*. 2019;11(6):39. (In Russ.).
13. Troitskaya E. A., Korol R. G. The organization of the terminal – satellite to service the industrial enterprises in the territories of priority development. *Transport: science, education, production. Collection of scientific papers*. Rostov-on-Don; 2018:79–83. (In Russ.).
14. Reorientation and increase in railway freight traffic to the East. New rules and trade. Zone of comfort and stability. Interview with Sergey Pavlov, First Deputy General Director of Russian Railways. *RZD TV: [site]*. (In Russ.). URL: <https://rzdrtv.ru/2022/06/16/sergej-pavlov-pervyj-zamestitel-generalnogo-direktora-oao-rzhd/>.
15. A giant construction project will be launched in Primorye within the boundaries of the Mikhailovsky TOR. *RIA Vostok-Media: [site]*. (In Russ.). URL: <https://vostokmedia.com/news/society/20-06-2022/gigantskuyu-stroyku-razvernut-v-primorie-v-granitsah-tor-mihaylovskiy>.

Информация об авторе

Р. Г. Король – заведующий кафедрой «Технология транспортных процессов и логистика» Дальневосточного государственного университета путей сообщения, доцент, кандидат технических наук.

Information about the author

R. G. Korol – Head of the Technology of Transport Processes and Logistics Department, Far Eastern State Transport University, Associate Professor, Candidate of Engineering.

Статья поступила в редакцию 13.07.2022; одобрена после рецензирования 27.09.2022; принята к публикации 07.10.2022.

The article was submitted 13.07.2022; approved after reviewing 27.09.2022; accepted for publication 07.10.2022.

TRANSPORT

Научная статья
УДК 656.222.4.021.8:656.222.2
doi 10.52170/1815-9265_2022_63_15

Особенности путевого развития специализированных железнодорожных линий для обеспечения бесшовных технологий перевозки тяжеловесных грузов

Александр Романович Черняк¹, Сергей Владимирович Карасев²✉

^{1,2} Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

¹ chernyak.jdsu@yandex.ru

² gdsugdsu@yandex.ru✉

Аннотация. В статье рассмотрены способы повышения провозной способности железнодорожных линий в условиях роста объемов перевозок массовых грузов, что актуально для России из-за смещения вектора транспортировки тяжеловесного грузопотока в сторону Юго-Восточной Азии, а также из-за перспектив сооружения фидерных железнодорожных линий, обеспечивающих освоение месторождений полезных ископаемых в Сибири и на Дальнем Востоке. Приведен анализ достоинств и недостатков повышения провозной способности как за счет увеличения количества поездов, так и за счет увеличения количества вагонов, их вместимости и грузоподъемности. Определено, что за счет развития тяжеловесного движения в совокупности со специализированными железнодорожными линиями может быть достигнута так называемая бесшовная технология транспортировки массовых грузов с минимизацией остановок, маневровой работы и других непроизводительных операций, что позволит обеспечить высокий уровень провозной способности. Проанализированы особенности железнодорожной инфраструктуры Австралии как страны, которая достигла лучших результатов в мире в бесшовных технологиях тяжеловесного движения поездов. Определены особенности схем путевого развития в местах погрузки и перевалки на морской транспорт, особенности организации движения поездов при помощи «регулирующих» станций. Полученный опыт может быть полезен при проектировании и строительстве специализированных линий в России.

Ключевые слова: провозная способность, тяжеловесное движение, специализированные линии, бесшовные технологии, Австралия, кольцевые схемы

Для цитирования: Черняк А. Р., Карасев С. В. Особенности путевого развития специализированных железнодорожных линий для обеспечения бесшовных технологий перевозки тяжеловесных грузов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 4 (63). С. 15–27. DOI 10.52170/1815-9265_2022_63_15.

TRANSPORT

Original article

Features of specialized railway lines track development to ensure seamless technologies for the heavy cargo transportation

Alexander R. Chernyak¹, Sergey V. Karasev²✉

^{1,2} Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

¹ chernyak.jdsu@yandex.ru

² gdsugdsu@yandex.ru✉

Abstract. The article considers ways of increasing the carrying capacity of railway lines in the conditions of growth in the volume of mass freight traffic, that is relevant to Russia because of the heavy freight traffic vector shift towards South-East Asia, as well as the prospects of building feeder railway lines to ensure the development of mineral deposits in Siberia and the Far East. The advantages and disadvantages of increasing carrying capacity, both by increasing the number of trains and by increasing the number of cars, their capacity and carrying capacity are analyzed. It is determined that due to the development of heavy-weight traffic in conjunction with specialized railway lines, the so-called seamless technology of mass freight transportation, with the minimization of stops, shunting and other non-productive operations that will ensure a high level of carrying capacity, can be achieved. The features of the Australian railway infrastructure, as the country that has achieved the best results in the world

in the seamless technology of heavy train traffic, are analyzed. The specific features of track development schemes at loading and transshipment points to sea transport, the peculiarities of train traffic organization with the help of regulating stations are defined. The obtained experience can be useful in the design and construction of specialized lines in Russia.

Keywords : capacity, heavy traffic, specialized lines, seamless technology, Australia, circular schemes

For citation : Chernyak A. R., Karasev S. V. Features of specialized railway lines track development to ensure seamless technologies for the heavy cargo transportation. The Siberian Transport University Bulletin. 2022;(63):15–27. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_63_15.

Введение

Развитие промышленности в нашей стране и за рубежом требует повышения эффективности транспортного процесса, в том числе по перевозке сырья и готовой продукции, а также оптимизации экспортно-импортных схем транспортировки грузов. С каждым годом увеличиваются объемы добычи и производства, что повышает нагрузку на мировую транспортную сеть. В сегменте перевозки массовых грузов обеспечение этого процесса в значительной степени связано с работой железнодорожного транспорта. Для России проблема обеспечения возрастающих объемов перевозки массовых грузов также актуальна. Не последнее значение при этом имеет неравномерный рост объемов перевозок по различным регионам, обусловленный сложившейся внешнеполитической ситуацией. В результате значительно усилилась роль стран Юго-Восточной Азии в качестве основных потребителей российского экспорта. Произошло существенное по объему и весьма сжатое во времени перераспределение грузо- и поездопотоков на железнодорожной сети в направлении Восточного полигона, что обострило масштабную задачу его развития для достижения необходимой и достаточной провозной способности [1]. При этом, помимо развития существующих транспортных коридоров, возникает и ряд сопутствующих задач, в том числе сооружения новых фидерных («питающих») железнодорожных линий, обеспечивающих развитие месторождений полезных ископаемых, расположенных на территории Сибири и Дальнего Востока. При решении задач развития инфраструктуры и технологий перевозки массовых грузов интерес представляет опыт других стран, являющихся лидерами в этой области. При этом в большинстве случаев речь идет о специализированных железнодорожных линиях [2].

При анализе существующих решений необходимо учесть, что влияние на эффективность перевозок оказывает комплекс взаимодействующих структурно-технологических компонентов перевозочного процесса (инфраструктура, подвижной состав, технология [3]).

Для оценки уровня развития производства в различных странах используется индекс промышленного производства (ИП). Это ежемесячный экономический показатель, измеряющий реальный объем производства в обрабатывающей, добывающей, электроэнергетической и газовой промышленности по отношению к базовому году. Индекс производства показывает, насколько изменился суммарный объем всех произведенных товаров, выполненных работ и оказанных услуг в результате роста или снижения уровня их выпуска. На рис. 1 показана динамика мирового сводного индекса промышленного производства (ИПП) в области добычи полезных ископаемых [4].

Самый большой прирост с 2000 г. показывают страны Юго-Восточной Азии, что требует от них реализации соответствующих конструктивно-технологических решений для развития железнодорожного транспорта. Некоторые из них в отношении инфраструктуры, подвижного состава и технологии перевозок отличаются от отечественных, при этом обеспечивают высокую эффективность.

Материалы и методы исследования

Для перевозки массовых грузов в большинстве случаев используется железнодорожный транспорт. Поэтому с увеличением добычи полезных ископаемых увеличивается и нагрузка на железнодорожную сеть. Чтобы оценить, как справится линия с представленным объемом перевозок, можно использовать показатель провозной способности [5]. В общем виде годовую провозную способность железнодорожной линии в контексте взаимодействия структурно-технологических компо-

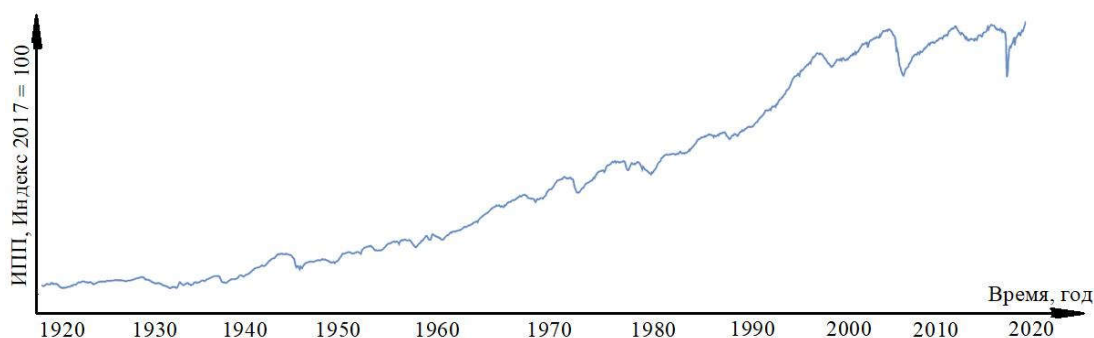


Рис. 1. Динамика изменения мирового индекса промышленного производства в области добычи полезных ископаемых

ментов перевозочного процесса предлагается оценивать при помощи следующей формулы:

$$Г = 365 \sum Q_i N_i, \quad (1)$$

где Q_i – масса брутто поезда i -й весовой категории *, т; N_i – среднесуточное количество грузовых поездов i -й весовой категории.

Исходя из формулы (1), увеличения провозной способности можно добиться тремя способами:

- 1) увеличением массы поездов (и, соответственно, объема перевозимого каждым поездом груза);
- 2) увеличением наличной пропускной способности;
- 3) сочетанием вариантов 1 и 2.

Увеличение массы перевозимого груза может достигаться:

- а) увеличением грузоподъемности и (или) вместимости вагонов, уменьшением коэффициента тары;
- б) увеличением количества вагонов в составе поезда, т. е. обращения поездов большей длины;
- в) сочетанием вариантов а и б.

Определенный эффект от повышения средней массы перевозимого в поезде груза будет иметь также увеличение в структуре пропускаемого поездопотока доли поездов, имеющих большую массу, например, в отечественном опыте – тяжеловесных, длиннооставных, соединенных и т. п. Однако в этом случае возможны негативные эффекты в виде усложнения технологии пропуска поездопотоков.

Анализ отечественного и зарубежного опыта показывает, что подходы к увеличению провозной способности железнодорожных линий для своевременной транспортировки добытых ресурсов от мест добычи до мест использования на территории страны (или в случае экспорта – до портов) в целом соответствуют перечисленным выше вариантам.

В одних странах увеличивают количество поездов N_i , в других – их массу Q_i . Оба варианта тесно связаны с рядом ограничений по инфраструктуре, тяговому и нетяговому подвижному составу, загрузкой линии, структурой поездопотока. Так, наилучшие результаты с точки зрения увеличения массы грузовых поездов достигаются на специализированных железнодорожных линиях [6]. Повышение массы поездов на линиях со смешанным грузовым и пассажирским движением, особенно при отсутствии резервов наличной пропускной способности, сталкивается с рядом ограничений конструктивного и технологического характера. К первым можно отнести несоответствия параметров инфраструктуры необходимым условиям обращения тяжеловесных и длиннооставных поездов. Такие несоответствия предлагается условно разделить на «нагрузочные» и «пространственные». «Нагрузочные» ограничения связаны с нагрузками от подвижного состава на верхнее и нижнее строения пути, искусственные сооружения; на электрифицированных линиях – также с нагрузкой на систему тягового энергоснабжения. «Пространственные» ограничения связаны с геометрическим развитием железнодорожной линии и технологией пропуска поездов по участку, например, с полезной длиной приемо-

* С учетом возможности обращения на линии поездов различной массы.

отправочных путей промежуточных, начальных, конечных раздельных пунктов линии, а также их компоновочными решениями.

Сравнительный анализ достоинств и недостатков различных способов увеличения провозной способности приведен на рис. 2.



Рис. 2. Сравнительный анализ достоинств и недостатков различных способов увеличения провозной способности

Очевидно, что вопрос выбора рационального способа обеспечения необходимой провозной способности требует комплексной оценки вариантов для конкретных условий, для чего определенную пользу могут принести наработки и опыт других стран, прежде всего в области тяжеловесного движения. Необходимо проанализировать опыт стран в области тяжеловесного движения, изучить особенности организации движения поездов, путевого развития, инфраструктуры и технологий грузовых и технических операций. В итоге анализ должен показать, в чем состоит специфика работы специализированных линий, за счет каких решений обеспечивается высокая эффективность работы таких линий. С учетом дальнейшей проработки и адаптации полученного опыта его можно будет применять и в России.

Результаты исследования

Анализ имеющихся в зарубежных странах [7] конструктивно-технологических решений по освоению значительных грузопотоков при перевозке показал, что страны-лидеры в добыче полезных ископаемых, такие как Австралия, Бразилия, ЮАР, в большинстве случаев выбирают второй путь – повышение провозной способности за счет увеличения длины поездов и грузоподъемности вагонов. Такие поезда используются для перевозки массовых грузов: нефть и газ, руда железная, каменный уголь, лес, зерно, контейнеры, металлопродукция и т. д. В разных странах свои критерии для определения тяжеловесных поездов.

Подходы к организации перевозок во всем мире отличаются: от чисто рыночного взгляда на транспорт как на обособленный рынок до позиционирования перевозок как исключительно социальной функции, выполнение которой – обязанность государства или муниципалитетов. Но, какой бы ни была модель организации перевозок, для клиентов приоритетом остается быстрая, качественная, безопасная и недорогая перевозка. Это понимание воплотилось в концепции MAAS – Mobility as a Service, о которой сегодня много пишут и говорят в транспортном сообществе [8]. В этой концепции одно из важных мест занимает бесшовность транспортного обслуживания. Бесшовность означает, что все компоненты транспортной системы, вовлеченные в создание «услуги по обеспечению мобильно-

сти», должны быть плотно, устойчиво и непрерывно интегрированы между собой. Достичь бесшовности транспортной системы впервые получилось на Австралийских железных дорогах при организации тяжеловесного движения поездов за счет применения кольцевых схем обслуживания пунктов погрузки и выгрузки, беспилотного вождения тяжеловесных поездов, автоматизации технологических процессов на всех элементах транспортно-логистической цепи.

Лидирующее место в мире по добыче и экспорту многих полезных ископаемых: золота, железной руды, свинца, никеля, рутила, тантала, урана и цинка – уже более 25 лет занимает Австралия. Добывающий сектор обеспечил стране продажу полезных ископаемых и нефти в 2020–2021 гг. на рекордную сумму 210 млрд долл. Добыча полезных ископаемых укрепила свои позиции в качестве доминирующего вида деятельности в секторе государственных ресурсов Австралии, составив 89 % от всех доходов [2].

Главный район добычи – Западная Австралия, район Пилбара, с самыми большими запасами железной руды в мире. Для развития региона и своевременного вывоза железной руды необходимо было создание эффективной железнодорожной транспортно-технологической системы. В итоге железнодорожная сеть в районе Пилбара стала одним из передовых и значимых полигонов развития тяжеловесного движения в мире. На рис. 3 показана конфигурация путевого развития трех основных перевозчиков в районе Пилбара: Rio Tinto, BHP Billiton и Fortescue.

На рассматриваемой сети можно выделить магистральные и примыкающие к ним фидерные («питающие») участки. Подобная конфигурация позволяет соединить районы непосредственной добычи с основными ходами железнодорожных линий, обеспечивающих транспортировку до конечных пунктов. В Австралии, с учетом ориентации на экспорт, это морские порты северного побережья.

Для организации быстрой и ритмичной работы такой транспортной системы необходимо было обеспечить бесшовность технологии, заключающуюся в отсутствии потребности в маневровой работе в пунктах погрузки и ее минимизации в пунктах выгрузки, а также в отсутствии остановок в пути следования тя-

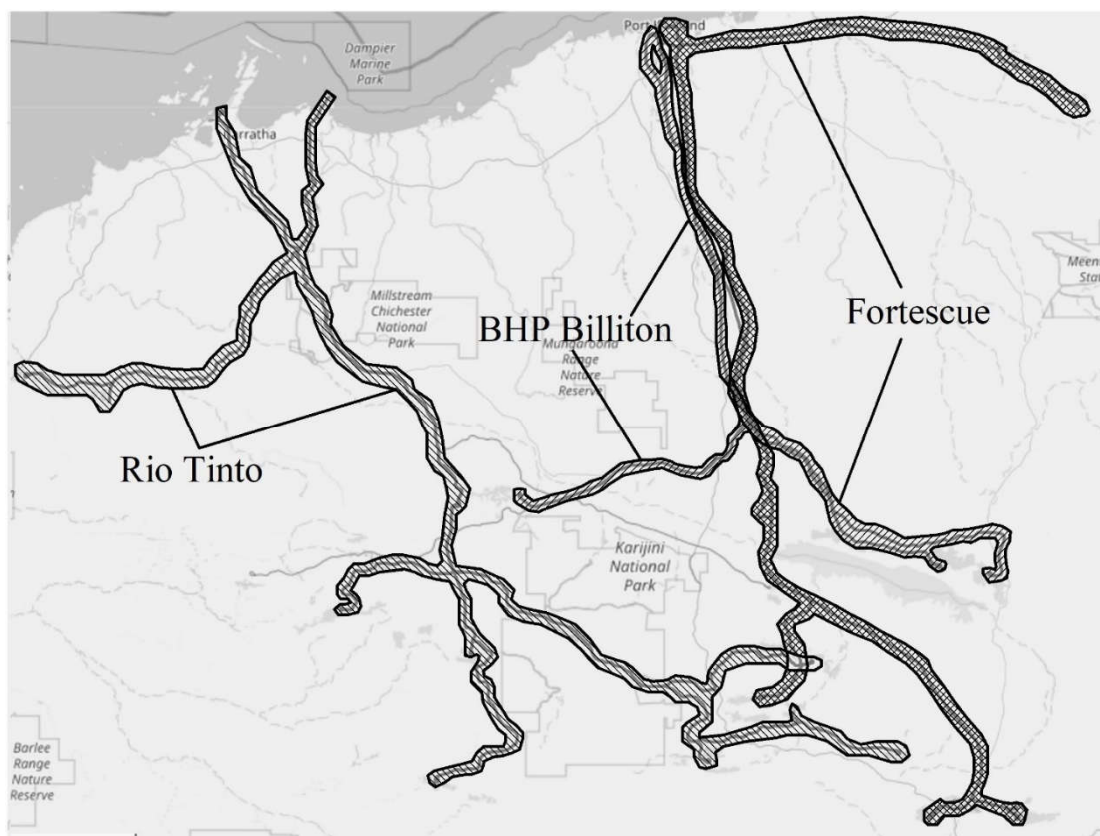


Рис. 3. Схема железнодорожной сети Западной Австралии

желовесных поездов. Как в пунктах погрузки, так и в пунктах выгрузки такая технология обеспечивается использованием путевых петель (колец) для проведения грузовых операций в процессе движения состава. Использование подобной инфраструктуры вместо раздельных пунктов с поперечно расположенными путями исключает потребность в делении состава на части и маневровой работе по подаче и уборке вагонов отдельными группами, расформировании и формировании поездов. Соответствующие элементы простоя исключаются. Это благоприятно сказывается на обороте поездов, потребном парке грузовых вагонов и локомотивов. На рис. 4 приведены некоторые места добычи с типичным путевым развитием.

Анализ показал, что некоторые отличия в конструктивных решениях и путевом развитии петель зависят в основном от мощности места добычи. Самой распространенной является однопутная петля (схемы *a* и *г* на рис. 4), она обычно используется при годовой добыче от 8 до 25 млн т руды в год. Для обслуживания более мощных разрезов используются двухпутные или трехпутные петли (схемы *б*, *д*, *е* на

рис. 4). Такие петли позволяют осуществлять параллельно погрузку нескольких поездов или разделить поезд на несколько составов и погрузить их отдельно, после чего соединить вместе. Так, например, годовая мощность Tom Price составляет 38 млн т, а Newman – 32 млн т. Длина петель варьируется от 5 до 8 км. Это означает возможность беспрепятственной погрузки составов такой же длины. Схема *в* на рис. 4 представляет собой промежуточный вариант.

Используются две технологии погрузки – бункерная и тоннельная. Оба варианта основываются на принципе погрузки под силой тяжести самого груза. Отличие – в необходимой инфраструктуре. Если для бункерной технологии необходимы специальные бункеры (разрез Yandicoogma), в которые по сети конвейеров попадает железная руда с разреза, то для тоннельной (разрез Tom Price) необходим тоннель, сверху которого располагается площадка для хранения железной руды.

В местах выгрузки (портах) также чаще всего используется петлевая схема путевого развития. На рис. 5 представлены схемы основных портов района Пилбара.

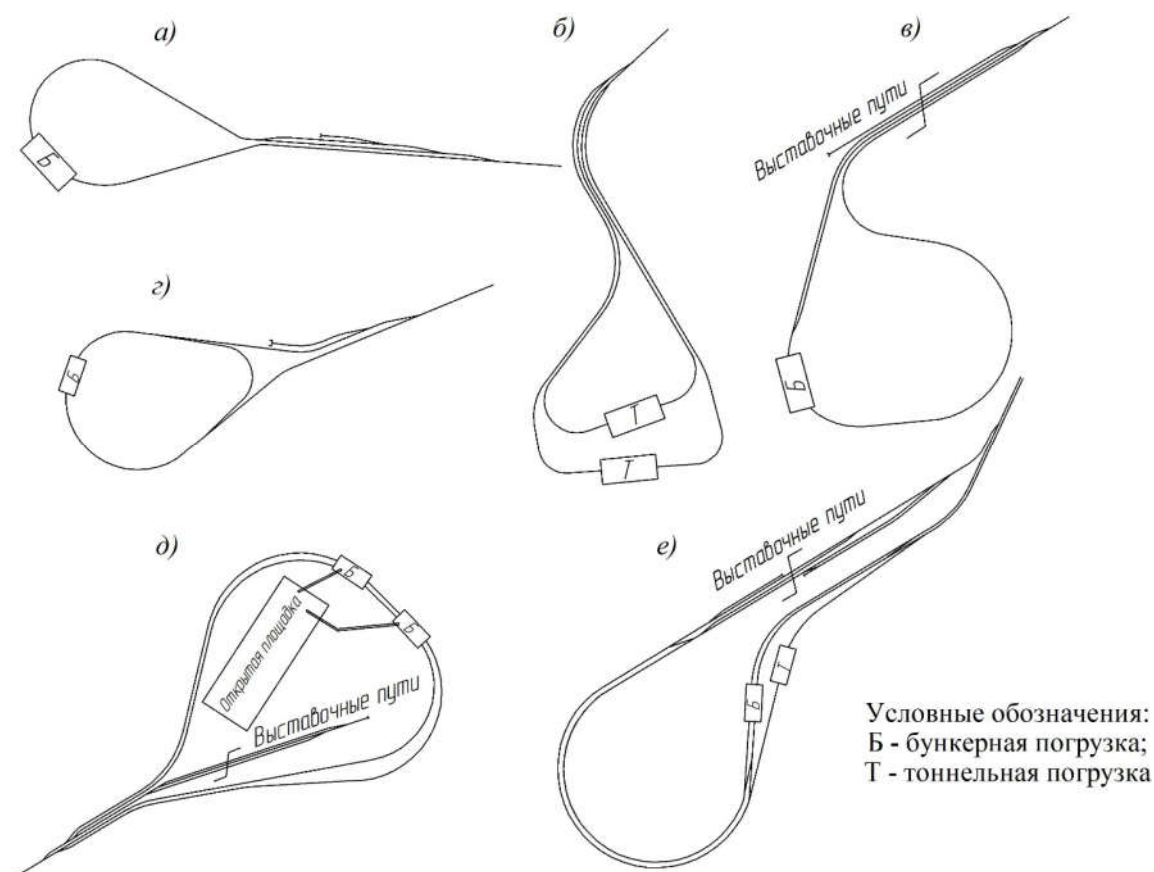


Рис. 4. Путьевые погрузочные петли на разрезах района Пилбара:
 а – Brockman; б – Tom Price; в – Paraburdoo; г – Mesa A; д – Yandicoogma; е – Newman

В зависимости от мощности портов петли также бывают однопутные, двухпутные и трехпутные. При помощи такого путевого развития происходит безостановочная и быстрая выгрузка поездов и погрузка судов. Выгрузка осуществляется при помощи вагоноопрокидывателей, по системе конвейеров железная руда перемещается на склад и далее – в подошедшее судно. Обычно подготовка составов под выгрузку происходит в самих портах (порт Hedland), но также встречаются предпортовые станции. В части портов (схемы а, б, д на рис. 5), также как и в пунктах погрузки, используются обычные путьевые петли. Исключения составляют портовые станции, на которых предусматривается выполнение технических операций с вагонами и локомотивами (схема в на рис. 5).

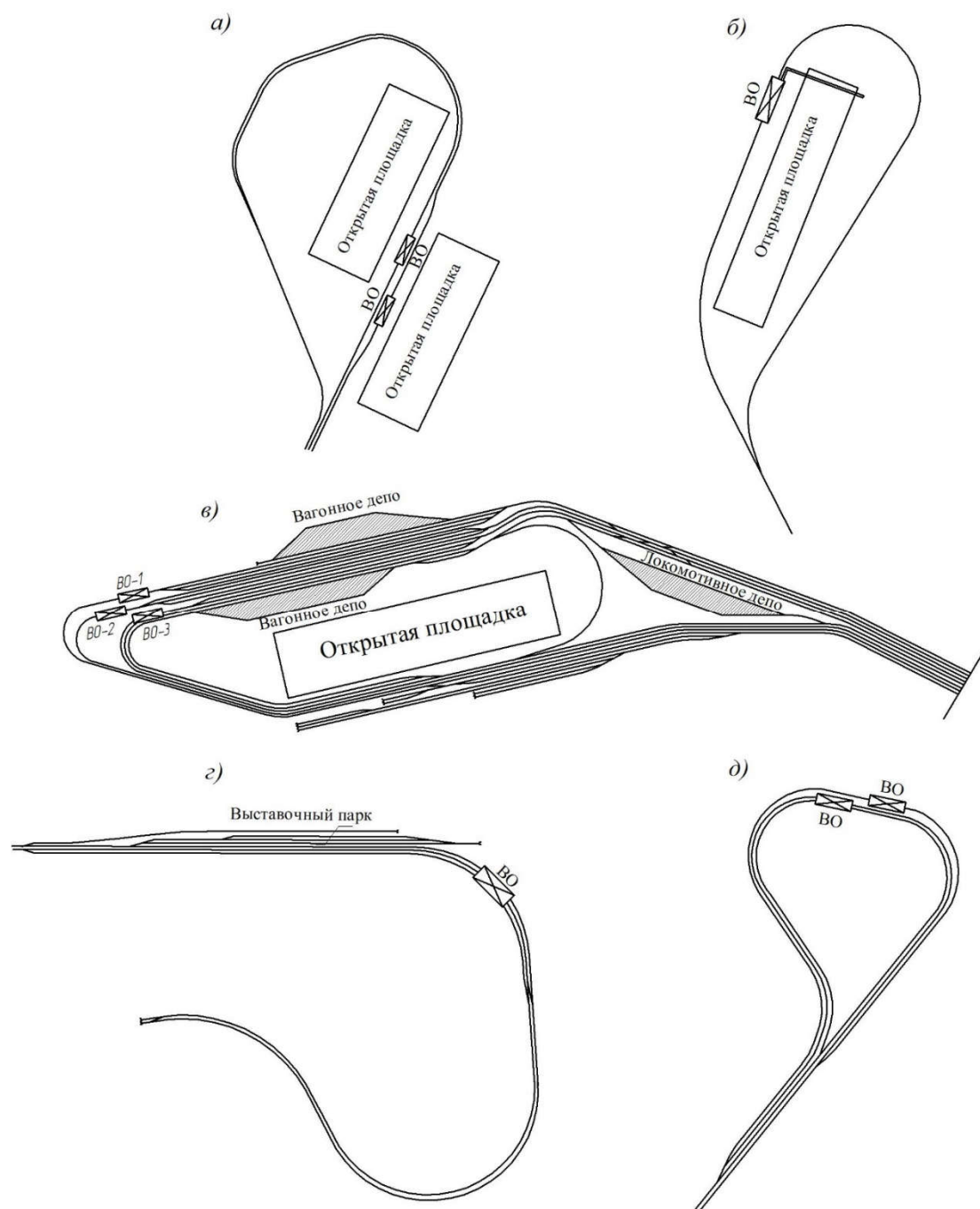
На рис. 6 изображена схема предпортовой станции Seven Mile компании Rio Tinto.

Появление технических операций приводит к потребности использования полноценных (в случае Австралии – предпортовых) железнодорожных станций, конструктивные

схемы и технология работы которых близки к решениям, известным в отечественной практике.

Предпортовая станция состоит из двух парков – сортировочного и приемо-отправочного. Полезная длина путей варьируется от 1 300 до 1 500 м. Также на станции расположены вагонное и локомотивное депо. На станции поезда, состоящие из 240 вагонов и 3 локомотивов, делятся на три отдельных состава (группы). Поездные локомотивы переставляются в депо для технического обслуживания и экипировки, а в хвост составам прицепляются подталкиватели, которые обеспечивают подачу групп вагонов в порт (как правило, станция располагается от него в непосредственной близости), имеют более мощные тормозные системы, что позволяет точно перемещать вагоны на выгрузочных площадках.

В направлении пунктов погрузки одна из главных функций станции – обеспечение рациональной очередности и интервалов между поездами при отправлении, в зависимости от дальности места погрузки меняются интер-



Условные обозначения:
ВО – вагоноопрокидыватель

Рис. 5. Путевые разгрузочные петли в портах района Пилбара*:
а – терминал Finucane Island (BHP Billiton); б – терминал Roy Hill (Fortescue);
в – порт Hedland (BHP Billiton); г – порт Dampir (Rio Tinto); д – порт Herb Elliott (Fortescue)

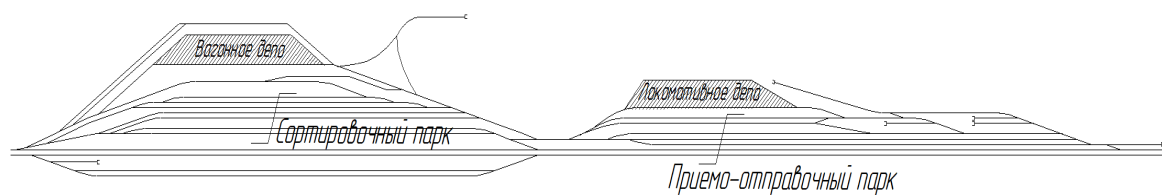


Рис. 6. Предпортовая станция Seven Mile (Rio Tinto)

* На схеме г – полупетля.

валы между отправлениями, необходимые для исключения скрещения поездов.

Практически вся сеть железных дорог района Пилбара (как магистральных, так и фидерных участков) представляет собой однопутные линии (рис. 7). Двухпутные вставки устраиваются при приближении к портам из-за сгущения поездопотока (порт Wilhelm). Для регулировки интервалов между поездами и безопасного движения по однопутным перегонам существуют «регулирующие» станции. На сети дорог Rio Tinto «регулирующая» станция расположена в месте сгущения поездопотоков с трех железорудных бассейнов. Схема станции представлена на рис. 7. Для каждого направления выделено по два пути, полезная длина которых варьируется от 2,6 до 3,2 км. Такие станции позволяют регулировать интервалы между поездами, очередность отправления, безопасно производить скрещение.

В других странах, развивающих тяжеловесное движение поездов, тоже происходит развитие перевозочного процесса по пути бесшовных

технологий. В местах добычи и перевалки также применяются петлевые схемы, некоторые из которых приведены на рис. 8. Одним из главных факторов устройства такой схемы путевого развития является рельеф, близкий к равнинному. В таких странах, как Канада, Швеция и Норвегия, из-за сложного гористого рельефа применяются тупиковые схемы путевого развития, что не позволяет им полностью перейти к бесшовным технологиям.

Анализ железнодорожной инфраструктуры стран – лидеров в области перевозки массовых грузов показывает, что в большинстве случаев развитие тяжеловесного движения происходит параллельно с развитием специализированных линий, поскольку такие линии позволяют существенно снизить время оборота поездов из-за ликвидации части технических операций на перегонах и станциях и обеспечивают весьма высокую провозную способность. На таких линиях возможно существенное увеличение массы и длины грузовых поездов. Из-за простоты технологических

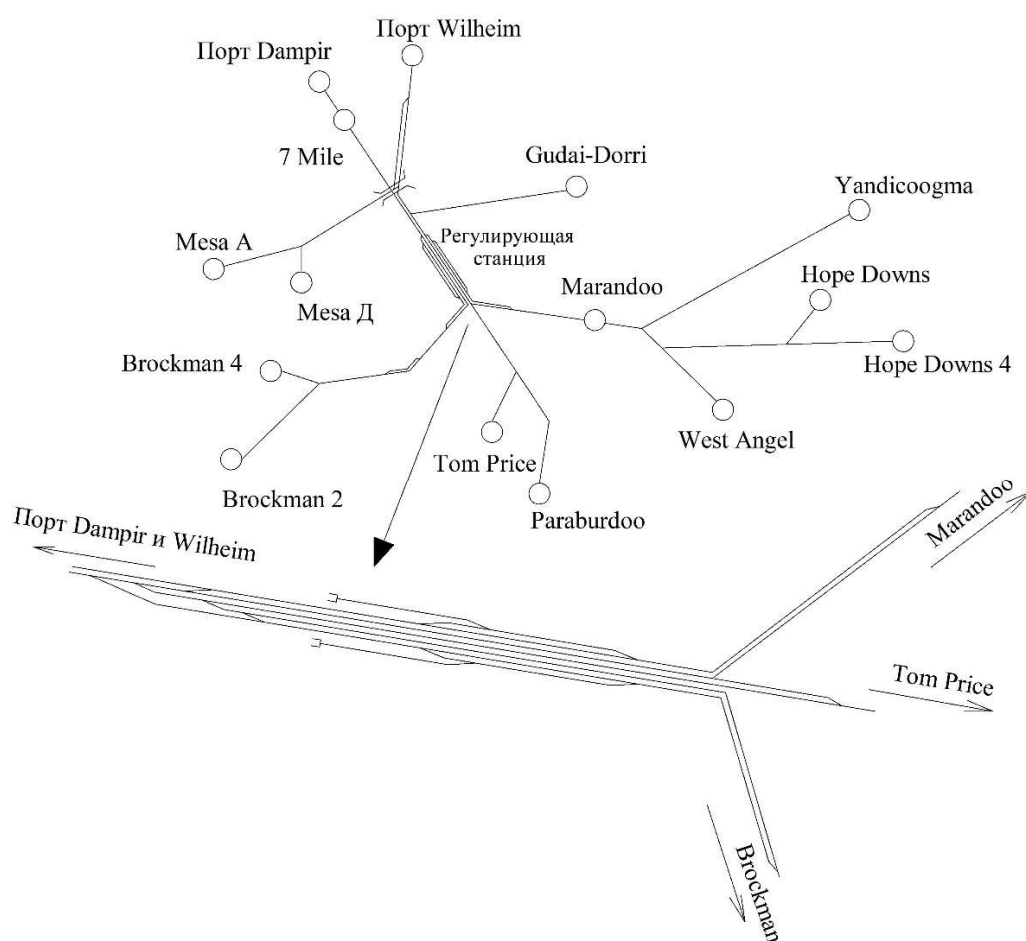


Рис. 7. Схема железнодорожной сети Rio Tinto и «регулирующей» станции

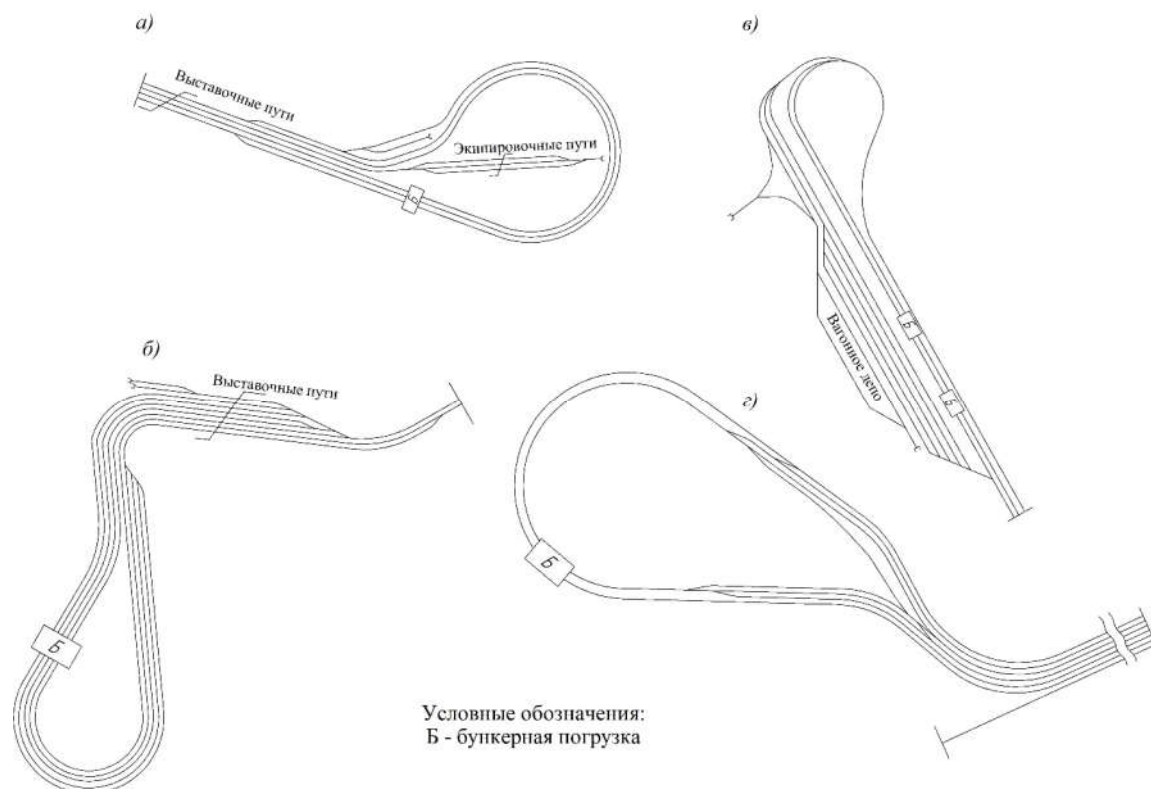


Рис. 8. Конструктивно-технологические решения погрузочных петель в различных странах

($P_{\text{год}}$ – годовой объем погрузки):

а – разрез Heidaigou (КНР), $P_{\text{год}} = 37$ млн т (уголь); б – разрез Carajás (Бразилия), $P_{\text{год}} = 296$ млн т (железная руда); в – разрез Sishen (ЮАР), $P_{\text{год}} = 29$ млн т (железная руда); г – разрез Black Thunder (США), $P_{\text{год}} = 99$ млн т (уголь)

операций, выполняемых на таких линиях, появляется возможность автоматизированного управления поездами на всей логистической цепочке – от мест погрузки до мест выгрузки. В таблице представлены некоторые обобщенные характеристики линий, на которых курсируют тяжеловесные поезда [9–11].

Выводы

В связи с развитием промышленности необходимо параллельно развивать и транспортную сеть для удовлетворения потребностей в перевозке грузов с мест добычи до мест переработки или до мест перевалки. Для этого необходимо увеличивать провозную способность существующих железнодорожных линий. Для России в настоящее время это особо актуально из-за смещения грузопотока на Восточный полигон, а также из-за потребности сооружения фидерных железнодорожных линий для освоения новых месторождений полезных ископаемых в Сибири и на Дальнем Востоке.

Нами были выделены следующие основные способы повышения провозной способности линий:

- за счет увеличения наличной пропускной способности;
- за счет увеличения длины и массы составов;
- комбинированный способ.

По каждому способу выделены и систематизированы в виде схемы достоинства и недостатки. Особенности способов связаны с необходимостью учета взаимного влияния основных структурно-технологических компонентов перевозочного процесса: инфраструктуры, транспортных единиц и технологии перевозки. С точки зрения развития инфраструктуры условия их реализации предлагается связывать с «нагрузочными» и «пространственными» ограничениями. «Нагрузочные» ограничения связаны с нагрузками от подвижного состава на верхнее и нижнее строения пути, искусственные сооружения; на электрифици-

Показатели работы железнодорожных линий стран с тяжеловесным движением

Страна	Название железной дороги	Ширина колеи, мм	Специализация	Длина линии, км	Масса поезда, т	Число вагонов, ваг.	Осевая нагрузка, т/ось	Путевое развитие в пунктах погрузки и выгрузки
Австралия	Rio Tinto	1435	Специализированная	1 700*	29 500	226	32,5	Петлевое
Австралия	BHP Billiton	1435	Специализированная	1 426*	30 200	240	31,5	Петлевое
Австралия	Fortescue	1435	Специализированная	459	38 400	240	40,0	Петлевое
Китай	Daqin	1435	Специализированная	653	30 000	320	23,5	Тупиковое/петлевое
Бразилия	EFC	1600	Специализированная	892	43 000	330	32,5	Петлевое
Бразилия	EFVM	1000	Смешанная	905	32 000	312	25,5	Петлевое
Индия	WDFC/EDFC	1667	Специализированная	1 504/ 1 318	13 000	120	27,0	Тупиковое/петлевое
ЮАР	Coal line	1067	Специализированная	594	20 800	200	20,0/26,0	Петлевое
ЮАР	Iron line	1067	Специализированная	861	45 000	375	30,0	Петлевое
Канада	Canadian Pacific	1435	Смешанная	1 100	18 200	152	30,0	Тупиковое
США	Orin line	1435	Специализированная	201	38 300	270	35,5	Петлевое
Швеция/ Норвегия	Malmaban/ Ofotban	1435	Специализированная	497/ 39	8 840	68	32,5	Тупиковое

* В сумме с подъездными путями.

рованных линиях – также с нагрузкой на систему тягового энергоснабжения. «Пространственные» ограничения связаны с пространственным, геометрическим развитием железнодорожной линии и технологией пропуска поездов по участку, например, с полезной длиной приемо-отправочных путей промежуточных, начальных, конечных раздельных пунктов линии, а также их компоновочными решениями.

При анализе способов повышения провозной способности стран-лидеров в тяжеловесном движении было выявлено, что лучшим способом является увеличение массы и длины составов. В таких странах, как Австралия, Бразилия, ЮАР, Швеция, Норвегия, Китай, используются специализированные линии для организации движения тяжеловесных поездов, что позволяет достичь высокого уровня бесшовности транспортировки массовых грузов. Бесшовные технологии – новый тренд на транспортном рынке. Они позволяют достичь безостановочного и интенсивного движения грузов по транспортной сети. Больших успе-

хов в этой технологии достигла Австралия, ее опыт можно считать эталонным для развития специализированных железнодорожных линий в России с учетом адаптации к местным условиям.

Было рассмотрено путевое развитие Австралии в местах добычи и перевалки железной руды в районе Пилбара, выявлены типовые решения и условия их применения. В большинстве случаев применяются петлевые или кольцевые (замкнутая петля) схемы, что позволяет производить грузовые операции в пунктах погрузки и выгрузки без дополнительных маневровых операций с составом. Отличительной особенностью организации движения является беспилотное движение поездов, что сокращает такие операции, как, например, смена локомотивных бригад. При этом за счет обращения тяжеловесных поездов высокая провозная способность обеспечивается при значительных интервалах между ними, т. е. при далекой от предела загрузке линии. Практически вся сеть представляет собой однопутные перегоны, где в местах сгущения поездопотока устраиваются «регулиру-

рующие» железнодорожные станции для обеспечения оптимальной очередности и интервалов между поездами в зависимости от дальности их следования.

Анализ опыта других стран с развитым тяжеловесным движением показал, что аналогичные схемы путевого развития используются практически повсеместно, кроме стран со сложными природными условиями (в том числе ре-

льефом) – Канады, Швеции и Норвегии. Но и там разрабатываются технологии для обеспечения бесшовности переработки грузопотока.

Таким образом, развитие специализированных линий для тяжеловесного движения в России является актуальной темой, полученный зарубежный опыт может быть полезен для будущей проработки технических и технологических решений в этой области.

Список источников

1. Скорлыгина Н. А. Разворот на Восток // Коммерсантъ. Приложение «Логистика». 2022. № 89. С. 1–9.
2. Черняк А. Р., Карасев С. В. Анализ добывающего сектора Австралии и его влияние на железнодорожную сеть в районе Пилбара // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2021. № 2 (3). С. 123–129.
3. Карасев С. В. Специализация линейных объектов железнодорожной инфраструктуры как резерв повышения эффективности перевозочного процесса // Политранспортные системы : материалы X Международной научно-технической конференции, Новосибирск, 15–16 ноября 2018 г. Новосибирск : Издательство Сибирского государственного университета путей сообщения, 2019. С. 165–168.
4. Industrial Production: Total Index // Economic Research : [сайт]. URL: <https://fred.stlouisfed.org/series/INDPRO> (дата обращения: 06.06.2022).
5. Левин Д. Ю. Основы управления перевозочными процессами : учебное пособие. Москва : Инфра-М, 2014. 263 с.
6. Захаров С. М., Шенфельд К. П. Развитие тяжеловесного движения в мире // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2013. № 4. С. 9–18.
7. Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения: конструкция и содержание железнодорожной инфраструктуры : [сборник статей] / [М. Роуни и др. ; пер. с англ.: ООО «Интекст» и С. М. Захаров] ; Международная ассоциация тяжеловесного движения. Москва : Интекст, 2012. 567 с.
8. Володькина А. А. Бесшовный путь // Пульс управления. 2022. № 7. С. 1–9.
9. Беседин И. С., Мугинштейн Л. А., Захаров С. М. Развитие тяжеловесного движения на железных дорогах мира // Железные дороги мира. 2006. № 9. С. 39–48.
10. International Heavy Haul Association : [сайт]. URL: <https://ihha.net/what-we-do-ihha> (дата обращения: 07.05.2022).
11. Transportation Technology Center : [сайт]. URL: <https://www.ttc.tech/> (дата обращения: 14.05.2022).

References

1. Skorlygina N. A. Turn to the East. *Kommersant. Logistics*. 2022;(89):1–9. (In Russ.).
2. Chernyak A. R., Karasev S. V. Analysis of Australian extractive sector and its impact on the railway network in the Pilbara region. *Fundamental and applied issues of transport*. 2021;(3):123–129. (In Russ.).
3. Karasev S. V. Specialization of linear objects of railway infrastructure as a reserve to improve the efficiency of the transportation process. *Polytransport systems: Proceedings of the X International Scientific and Technical Conference, Novosibirsk, November 15-16, 2018*. Novosibirsk: Publishing House of Siberian Transport University; 2019. P. 165–168. (In Russ.).
4. Industrial Production: Total Index. *Economic Research*: [site]. URL: <https://fred.stlouisfed.org/series/INDPRO>.
5. Levin D. Yu. Management fundamentals of transportation processes: a training manual. Moscow: Infra-M; 2014. 263 p. (In Russ.).
6. Zakharov S. M., Shenfeld K. P. Development of heavy traffic in the world. *Bulletin of the Research Institute of Railway Transport*. 2013;(4):9–18. (In Russ.).
7. Generalization of the world experience of heavy traffic: construction and maintenance of railway infrastructure: [collection of articles] / [M. Roney et al.; translated from English: Intext Ltd. and S. M. Zakharov]; International Association of Heavy Rail Traffic. Moscow: Intext; 2012. 567 p. (In Russ.).
8. Volodkina A. A. Seamless way. *Control desk*. 2022;(7):1–9. (In Russ.).
9. Besedin I. S., Muginstein L. A., Zakharov S. M. Development of heavy-weight traffic on the railroads of the world. *Railways of the world*. 2006;(9):39–48. (In Russ.).

10. International Heavy Haul Association: [site]. URL: <https://ihha.net/what-we-do-ihha>.

11. Transportation Technology Center: [site]. URL: <https://www.ttcn.tech/>.

Информация об авторах

А. Р. Черняк – аспирант кафедры «Железнодорожные станции и узлы» Сибирского государственного университета путей сообщения.

С. В. Карасев – доцент кафедры «Железнодорожные станции и узлы» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

Information about the authors

A. R. Chernyak – Postgraduate Student of the Railway Stations and Junctions Department, Siberian State University.

S. V. Karasev – Associate Professor of Railway Stations and Junctions Department, Siberian State University, Candidate of Technical Sciences.

Статья поступила в редакцию 27.09.2022; одобрена после рецензирования 06.10.2022; принята к публикации 07.10.2022.

The article was submitted 27.09.2022; approved after reviewing 06.10.2022; accepted for publication 07.10.2022.

TRANSPORT

Научная статья
УДК 656.051
doi 10.52170/1815-9265_2022_63_28

Моделирование поездопотоков на участке Усть-Илимск – Хребтовая с целью увеличения пропускной способности

Юрий Игоревич Белоголов^{1✉}, Валерий Ерофеевич Гозбенко²

^{1,2} Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия

² Ангарский государственный технический университет, Ангарск, Россия

¹ belogolov_yi@irgups.ru ✉

² vgozbenko@yandex.ru

Аннотация. Повышение пропускной способности на железнодорожном транспорте остается одной из основных задач, которой в настоящее время уделяется большое внимание. В современных условиях для усиления пропускной и провозной способности актуальным является уплотнение графика движения, более полное использование имеющейся инфраструктуры и технических средств, применение современных интеллектуальных систем управления и других организационных и технических решений, направленных на переработку и формирование большего числа вагоно- и поездопотоков. В связи с этим в статье предлагается рассмотреть участок Усть-Илимск – Хребтовая, смоделировать его работу при внедрении системы интервального регулирования движения поездов и определить возможность пропуска большего количества поездов. График движения поездов на участке является неинтенсивным из-за использования полуавтоматической блокировки и одного главного пути, вследствие чего пропускается незначительное количество поездов, а провозная способность линии мала и не позволяет увеличить грузопоток, в то время как транспортировка большого количества грузов является актуальной задачей для данного региона.

С целью увеличения пропускной способности участка Усть-Илимск – Хребтовая и повышения дальнейшей перспективы его использования предложено смоделировать и рассчитать количество поездов, которое возможно пропустить по участку при внедрении, например, систем интервального регулирования движения поездов «Анаконда». Моделирование работы участка заключается в разработке алгоритма и построении потоковых моделей, отражающих прибытие и отправление поездов по его основным станциям, позволяющих выявить резервы времени в отпуске большего количества поездов. По результатам моделирования и расчетов производится построение ведомости поездопотоков участка, строится предлагаемый график движения поездов и рассчитываются его показатели. В заключение статьи делается вывод о перспективе применения инновационных технологий в области интервального регулирования движения поездов на участке Усть-Илимск – Хребтовая.

Ключевые слова: пропускная способность, интервальное регулирование движения поездов, моделирование, график движения поездов, потоковая модель, участок Усть-Илимск – Хребтовая, поездопоток

Для цитирования: Белоголов Ю. И., Гозбенко В. Е. Моделирование поездопотоков на участке Усть-Илимск – Хребтовая с целью увеличения пропускной способности // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 4 (63). С. 28–35. DOI 10.52170/1815-9265_2022_63_28.

TRANSPORT

Original article

Simulation of train flows on the section Ust-Ilimsk – Khrebtovaya to increase throughput

Yury I. Belogolov^{1✉}, Valery E. Gozbenko²

^{1,2} Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

² Angarsk State Technical University, Angarsk, Russia

¹ belogolov_yi@irgups.ru ✉

² vgozbenko@yandex.ru

Abstract. Increasing the capacity of the railway transport has been and remains one of the main tasks, which is given quite a lot of attention at the present time. In modern conditions, in order to strengthen the throughput and carrying capacity, it is important to tighten the traffic schedule, make fuller use of the existing infrastructure and

technical means, use modern intelligent control systems and other organizational and technical solutions aimed at processing and forming a larger number of car traffic and train traffic. In this regard, the article proposes to consider the section Ust-Ilimsk – Khrebtovaya, to simulate its work when introducing a system of interval regulation of train traffic and to determine the possibility of passing more trains. The train schedule on the section is not intensive due to the use of semi-automatic blocking and one main track, as a result of which a small number of trains are skipped, and the carrying capacity of the line is small and does not allow increasing freight traffic, while transporting more cargo is an urgent task for this region.

In order to increase the capacity of the Ust-Ilimsk – Khrebtovaya section and increase the further prospects for its use, it is proposed to model and calculate the possible number of trains that can be passed through the section when introducing, for example, Anaconda train interval control systems. The modeling of the work of the section consists in the development of an algorithm and the construction of flow models reflecting the arrival and departure of trains at the main stations of the section, which makes it possible to identify the time reserves in the departure of a larger number of trains. Based on the results of modeling and calculations, a list of train flows of the section is built, a proposed train schedule is built and its indicators are calculated. At the end of the article, a conclusion is made about the prospects for the use of innovative technologies in the field of interval regulation of train traffic on the Ust-Ilimsk – Khrebtovaya section.

Keywords: throughput capacity, interval control of train traffic, modeling, train schedule, flow model, section Ust-Ilimsk – Khrebtovaya, train flow

For citation: Belogolov Yu. I., Gozbenko V. E. Simulation of train flows on the section Ust-Ilimsk – Khrebtovaya to increase throughput. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(63):28–35. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_63_28.

Введение

Оптимальное использование пропускной способности железнодорожных линий является актуальной задачей. Из-за высокой сложности и многокритериальности такой задачи в большинстве случаев она решается в автоматизированных системах железнодорожного транспорта. При этом математические основы, алгоритмы и подходы к ее решению требуют дальнейшего совершенствования [1].

Увеличение размеров движения при сохранении существующего технического оснащения, используемых типов локомотивов и других параметров, связанных с перевозочным процессом, возможно, например, за счет внедрения на участке системы интервального регулирования движения поездов с минимальным межпоездным интервалом.

При рассмотрении задач, связанных с оптимальным планированием перевозочного процесса, достаточно часто применяют методы математического моделирования транспортных процессов, представляя их в виде потоковых моделей.

Таким образом, задача оптимального планирования перевозочного процесса сводится к моделированию такого процесса и представляет собой систему, подчиненную единой цели – созданию оптимальных условий работы железнодорожного транспорта.

Исходная потоковая модель участка Усть-Илимск – Хребтовая

Развитие промышленности в регионе подталкивает к развитию структурных подразделений отрасли – железнодорожных станций и, как следствие, к изменению технологии их работы и

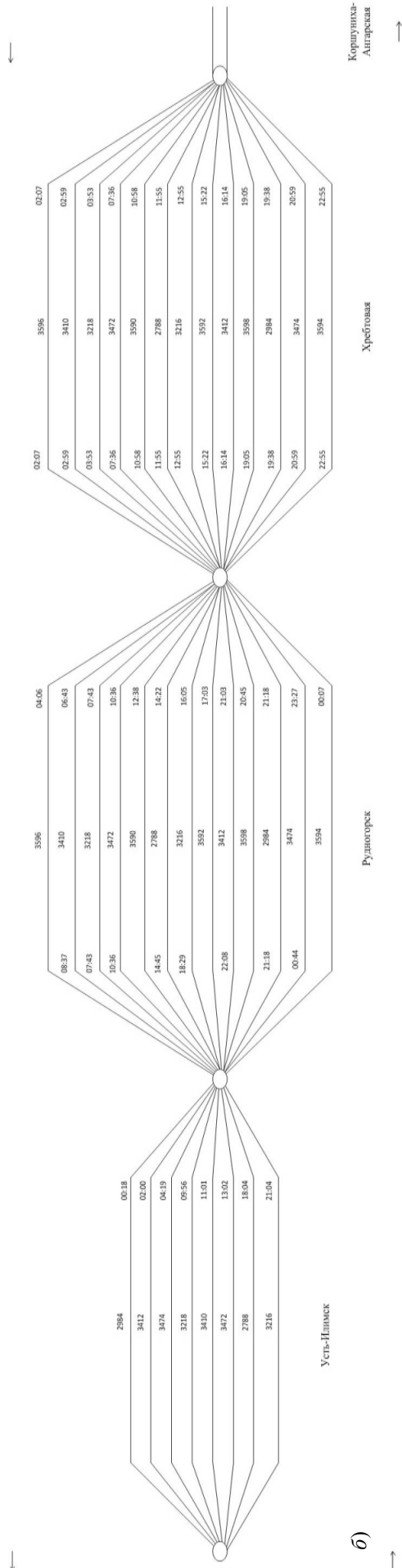
работы прилегающих участков. Основной объем маневровой работы участка Усть-Илимск – Хребтовая приходится на участковую станцию Усть-Илимск и грузовую станцию Рудногорск, поэтому для оптимизации работы участка необходимо рассмотреть план работы станций и возможность пропуска большего количества поездов в четном и нечетном направлениях за сутки. Рассмотрев техническую характеристику однопутного участка Усть-Илимск – Хребтовая, следует отметить, что участок Хребтовая – Рудногорск оборудован автоблокировкой, а Рудногорск – Усть-Илимск – полуавтоматической блокировкой.

Рациональная организация вагонопотоков на участке Усть-Илимск – Хребтовая – это одна из основных технологических задач эксплуатационной работы. Оптимизировав процесс поездообразования, можно снизить себестоимость перевозок, что, в свою очередь, обеспечит максимально возможную безубыточность перевозочного процесса [2–4].

Рассмотрение задачи оптимального планирования перевозочного процесса следует начинать, на наш взгляд, с исходных потоковых моделей движения поездов на участке в четном и нечетном направлениях. Построение исходных моделей с использованием теории графов для оценки изменения условий пропуска поездов на участке, после внедрения системы интервального регулирования движения поездов, позволяет упростить поиск решения и более наглядно смоделировать работу участка. Для рассматриваемого участка Усть-Илимск – Хребтовая были построены модели, представленные на рис. 1, для четного и нечетного направлений.

а)

30



Данные потоковые модели содержат номера поездов и время прибытия и отправления на соответствующие станции участка. Например, на рис. 1, а поезд № 2984 проследует станцию Хребтовая в 19 ч 38 мин, станцию Рудногорск в 21 ч 18 мин и прибывает на станцию Усть-Илимск в 00:18. Время «0» указано для составов поездов, сформированных на этих станциях.

Указанные потоковые модели участка Усть-Илимск – Хребтовая позволят определить оптимальное количество грузовых поездов на участке при условии минимизации допустимых интервалов, пропуске пассажирских и пригородных поездов, а также скорректировать существующий график движения поездов.

Алгоритм выработки требований к продвижению поездопотока по участку

На рассматриваемом участке Усть-Илимск – Хребтовая предполагается применение технологии «Анаконда» [5–7], которая позволит пропускать поезда с интервалом до 8 мин.

Поездопотоки на станции представлены в виде потоковой модели. Вершина первой доли потоковой модели отвечает за прогнозное время прибытия поездов на станцию i , а второй k – за время отправления поездов со станции. Задача отыскивания «весов» второй доли графа сводится к синтезированию дуг, соединяющих вершины различных долей графа, и вычислению потоков на них, чтобы реализовалось решение между истоками (прогнозное время прибытия на станцию i) и стоками графа (задача по отправлению поездов в запланированное время k).

Разработанный алгоритм приводит к упорядочению потоков прибытия и отправления поездов на станции участка и, как следствие, позволяет обеспечить пропуск как можно большего количества поездов за сутки в обоих направлениях.

Рассмотрим алгоритм [8, 9], представленный ниже, предварительно введя следующие обозначения: S – исток графа; A – сток графа; i, j, k – вершины долей графа; T – время на дугах между долями графа; T_{Si} – прогнозное время прибытия поездов на станцию; T_{kA} – прогнозное время отправления поезда со станции; $t_{\text{техн}}$ – время, затрачиваемое на обработку поезда на станции.

Для оценки эффективности пропуска грузовых поездов при внедрении, например, технологии «Анаконда», необходимо:

– сопоставить прогнозные время прибытия T_i с возможным T_j :

$$T_i > T_j, T_i = T_j, T_i < T_j;$$

– сопоставить временные интервалы прибытия I_i и отправления I_j для граничных станций участка (при условии $I_{\text{опт}} = 16$ мин):

$$I_i, I_k > I_{\text{опт}}; I_i, I_k = I_{\text{опт}}; I_i, I_k < I_{\text{опт}}.$$

Примем следующие допущения:

$$I_{\min} = 8 \text{ мин}; I_{\text{опт}} = 16 \text{ мин};$$

$$\Delta I_{\min} \{\Delta I_i; \Delta I_k\}; T_{Si}, T_{kA}, t_{\text{техн}} = \text{const}.$$

Алгоритм выработки требований к прибытию и отправлению поездов для станции участка Усть-Илимск – Хребтовая содержит шесть пунктов:

1. Положим, что $i = k = 1, j = 0$.

2. Если $\Delta I > I_{\text{опт}}$, то переходим к п. 3 алгоритма, если $\Delta I = I_{\text{опт}}$, то переходим к п. 4, если $\Delta I < I_{\text{опт}}$, то переходим к п. 5.

3. Вычислим: $\Delta I_{Si} = T_{Si} - T_{Si+1}$;

$$\Delta I_{kA} = T_{kA} - T_{kA+1}; j' = j + n,$$

$$n = \frac{\Delta I}{I_{\min}} - 1;$$

$$T_{\min(i,k)j} = T_{\min(Si,kA)} - I_{\min};$$

$$T_{\max(i,k)j} = T_{\min(i,k)j} - t_{\text{техн}},$$

$$i = i + 1, k = k + 1.$$

Если $\Delta I_{ij}, \Delta I_{kj} > I_{\text{опт}}$, то повторяем алгоритм по п. 3 для новых T_{ij} и T_{kj} , при этом $\Delta I_{ij} = T_{Si} - T_{ij}$; $\Delta I_{jk} = T_{kA} - T_{jk}$, иначе возвращаемся к п. 2. Если $i > i_{\max}$ или $k > k_{\max}$, то переходим к п. 6, иначе – к п. 2.

4. Вычислим: $\Delta I_{Si} = T_{Si} - T_{Si+1}$;

$$\Delta I_{kA} = T_{kA} - T_{kA+1}; j' = j + 1,$$

$$T_{\min(i,k)j} = T_{\min(Si,kA)} - I_{\min};$$

$$T_{\max(i,k)j} = T_{\min(i,k)j} - t_{\text{техн}},$$

$$i = i + 1, k = k + 1.$$

Если $i > i_{\max}$ или $k > k_{\max}$, то переходим к п. 6, иначе – к п. 2.

5. Вычислим: $\Delta I_{Si} = T_{Si} - T_{Si+1}$;

$$\Delta I_{kA} = T_{kA} - T_{kA+1}; j' = j = i,$$

$$T_{\min(i,k)j} = T_{\min(Si,kA)};$$

$$T_{\max(i,k)j} = T_{\min(i,k)j} - t_{\text{техн}},$$

$$i = i + 1, k = k + 1.$$

Если $i > i_{\max}$ или $k > k_{\max}$, то переходим к п. 6, иначе – к п. 2.

6. Составляем график прибытия и отправления поездов на станцию для всех значений i, j, k .

Рассмотрим фрагмент реализации алгоритма.

1.1. Положим, что $i = k = 1, j = 1$.

Исходные данные для дальнейших вычислений, согласно построенным потоковым моделям, будут следующие:

$$I_{\min} = 8 \text{ мин}; I_{\text{опт}} = 16 \text{ мин}; T_{Si=1} = 00:40; \\ T_{k=1} = 01:10; T_{Si=2} = 00:44; T_{k=2} = 01:59; \\ t_{\text{техн}}^1 = 00:20.$$

1.2. Вычислим:

$$\Delta I_{Si=3} = T_{Si=2} - T_{Si=1} = 00:44 - 00:40 = 00:04; \\ \Delta I_{kA} = T_{k=2} - T_{k=1} = 01:59 - 01:10 = 00:49; \\ \Delta I = \min(00:04; 00:49) = 00:04,$$

так как $\Delta I < I_{\text{опт}}$, то переходим к п. 5 алгоритма.

1.5. $j' = j + 1 = 1$;

$$T_{\min i=1} = 00:44 + 0 = 00:44;$$

$$T_{\max k=1} = 00:44 + 00:20 = 01:04, i = 2, k = 2.$$

Если $i > i_{\max}$, то переходим к п. 6 алгоритма, иначе – к п. 2.

Возвращаемся снова к п. 2 алгоритма.

2.1. Положим, что $i = k = 2, j = 2$.

Исходные данные для последующих вычислений, согласно построенным потоковым моделям, будут следующие:

$$I_{\min} = 8 \text{ мин}; I_{\text{опт}} = 16 \text{ мин}; T_{Si=2} = 00:44; \\ T_{k=2} = 01:59; T_{Si=3} = 02:23; T_{k=3} = 04:10; \\ t_{\text{техн}}^2 = 01:15.$$

2.2. Вычислим:

$$\Delta I_{Si=3} = T_{Si=3} - T_{Si=2} = 02:23 - 00:44 = 01:39; \\ \Delta I_{kA} = T_{k=3} - T_{k=2} = 04:10 - 01:59 = 02:11; \\ \Delta I = \min(01:39; 02:11) = 01:39,$$

так как $\Delta I > I_{\text{опт}}$, то переходим к п. 3 алгоритма.

...

13.1. Положим, что $i = k = 13, j = 147$.

Исходные данные для последующих вычислений, согласно построенным потоковым моделям, будут следующие:

$$I_{\min} = 8 \text{ мин}; I_{\text{опт}} = 16 \text{ мин}; \\ T_{Si=12} = 23:50; T_{k=12} = 00:37; \\ T_{Si=13} = 00:40; T_{k=13} = 0:10; t_{\text{техн}}^{13} = 00:40.$$

13.2. Вычислим:

$$\Delta I_{Si=10} = T_{Si=12} - T_{Si=13} = 00:40 - 23:50 = 00:50; \\ \Delta I_{kA} = T_{k=13} - T_{k=12} = 01:10 - 00:37 = 00:33; \\ \Delta I = \min(00:50; 00:33) = 00:33, \text{ так как} \\ \Delta I > I_{\text{опт}}, \text{ то переходим к п. 3 алгоритма.}$$

13.3. $n = 33 / 8 = 4; j' = 147 + 4 = 151$;

$$T_k^{151} = T_{Si=12} + I_{\min} = 23:50 + 00:08 = 23:58;$$

$T_i^{151} = 23:58 + 00:33 = 00:31; i = 13$, так как $i > i_{\max}$, то переходим к п. 6 алгоритма.

13.6. Составляется график прибытия и отправления поездов на станцию для всех значений i, j, k .

Построение уточненной потоковой модели

На участке Усть-Илимск – Хребтовая максимальное число поездов равно 151. Моделирование предусматривает движение в двухпутных направлениях, поэтому необходимо сократить количество поездов четного и нечетного направлений наполовину, так как на перегоне организовано однопутное движение.

Для более наглядного представления поездопотоков строится оптимальная потоковая модель (в данной статье не представлена) и составляется ведомость движения поездов, показанная на рис. 2.

После моделирования и расчетов в соответствии с разработанным алгоритмом для участка Усть-Илимск – Хребтовая строится график движения поездов (в работе не представлен) [10, 11].

Далее в таблице отражены значения показателей для участка Усть-Илимск – Хребтовая при существующей и возможной организации движения поездов.

Из таблицы видно, что многие показатели изменились. Значительно увеличилось количество грузовых поездов, что связано с сокращением межпоездного интервала до 8 мин.

Выводы

Предварительное моделирование работы участка позволяет дать первоначальную оценку при внедрении современной системы интервального регулирования движения поездов. Оптимизация существующего графика [12–15] движения поездов за счет применения, например, технологии «Анаконда» позволит увеличить участковую и техническую скорости в среднем на 17 %, время оборота локомотива сократить до 20 %. Внедрение современной системы интервального регулирования движения поездов на участке позволит приблизить межпоездной интервал к 8 мин, тем самым увеличив количество пропущенных поездов в обоих направлениях.

Нечетное направление																					
Усть-Илимск							Рудногорск							Хребтовая							
№	N	I	i _{пр}	j _{опт}	k _{опт}	k _{от}		N	I	i _{пр}	j _{опт}	k _{опт}	k _{от}	T	N	I	i _{пр}	j _{опт}	k _{опт}	k _{от}	
1	2003	8	—	4:52	5:22	5:22	4:02	3597	8	0:40	0:40	1:10	1:10	0:04	2513	8	0:27	0:27	0:27	0:27	
2		8	—	5:00	5:30	—		3003	8	0:44	0:44	1:59	—	1:39			8		0:35	0:35	
3		8	—	5:08	5:38	—			8	—	0:52	2:07	—					8		0:43	0:43
4		8	—	5:16	5:46	—			8	—	1:00	2:15	—					8		0:51	0:51
5		8	—	5:02	5:54	—			8	—	1:09	2:23	—					8		0:59	0:59
6		8	—	5:32	6:02	—			8	—	1:16	2:31	—					8		1:07	1:07
7		8	—	5:40	6:10	—			8	—	1:24	2:39	—					8		1:15	1:15
8		8	—	5:48	6:18	—			8	—	1:32	2:47	—			3410	8	1:30	1:30	1:30	1:30
9		8	—	5:56	6:26	—			8	—	1:46	2:55	—					8		1:46	1:46
10		8	—	6:04	6:34	—			8	—	1:54	3:03	—					8		1:54	1:54
11		8	—	6:12	6:42	—			8	—	2:02	3:11	—					8		2:02	2:02
12		8	—	6:20	6:50	—			8	—	2:10	3:19	—				8		2:10	2:10	
13		8	—	6:28	6:58	—			3475	8	2:23	2:23	4:10	4:10	2:22		8		2:18	2:18	
14		8	—	6:36	7:06	—			8		2:31	4:18	—					8		2:26	2:26
15		8	—	6:44	7:14	—			8		2:39	4:26	—					8		2:34	2:34
16		8	—	6:52	7:22	—			8		2:47	4:34	—				3218	8	2:50	2:50	2:50
17		8	—	7:00	7:30	—			8		2:55	4:42	—					8		2:58	2:58
18	3407	8	—	7:19	7:49	7:49		8		3:03	4:50	—					8		3:06	3:06	
19		8	—	7:27	7:57	—		8		3:11	4:58	—					8		3:14	3:14	
20		8	—	7:35	8:05	—	4:02	8		3:19	5:06	—				8		3:22	3:22		
21		8	—	7:43	8:13	—		3593	8	4:45	4:45	5:15	5:15				8		3:30	3:30	
22		8	—	7:51	8:21	—			8		4:53	5:23	—				8		3:38	3:38	
23		8	—	7:59	8:29	—			8		5:01	5:31	—			3597	8	3:49	3:49	3:49	
24		8	—	8:07	8:37	—			8		5:09	5:39	—				8		3:57	3:57	
25		8	—	8:15	8:45	—			8		5:17	5:47	—				8		4:05	4:05	
26		8	—	8:23	8:53	—			8		5:25	5:55	—				8		4:13	4:13	
27		8	—	8:31	9:01	—			8		5:33	6:03	—				8		4:21	4:21	
28		8	—	8:39	9:09	—			8		5:41	6:11	—				8		4:29	4:29	
29		8	—	8:47	9:17	—			8		5:49	6:19	—				8		4:47	4:47	
30		8	—	8:55	9:25	—			8		5:57	6:27	—			3705	8	4:59	4:59	4:59	
31		8	—	9:03	9:33	—		8		6:05	6:35	—				8		5:07	5:07		

Рис. 2. Фрагмент ведомости поездопотоков участка

Показатели работы участка Усть-Илимск – Хребтовая

Показатель	Значение	
	до моделирования	после моделирования
Количество поездов четного направления:		
грузовых	19	53
пассажирских	1	1
пригородных	2	2
Количество поездов нечетного направления:		
грузовых	22	59
пассажирских	1	1
пригородных	2	2
Участковая скорость, км/ч	36,8	55,0
Техническая скорость, км/ч	56,7	63,0
Коэффициент участковой скорости	0,65	0,87
Оборот локомотива, ч	11,7	10,5
Потребное количество поездных локомотивов, лок.	20	48
Среднесуточный пробег локомотива, км	482,3	504,7
Производительность локомотива, млн т-км брутто	2,78	3,23

Список источников

1. Симоченко А. С., Белькова Ю. Д., Белоголов Ю. И. Система «Анаконда» в сравнении с существующими системами интервального регулирования движения поездов // Молодая наука Сибири. 2021. № 2 (12). С. 102–107.
2. Ратобыльская Д. В. Пути повышения пропускной способности участков железнодорожной сети на основе имитационного моделирования // Математические машины и системы. 2010. № 2. С. 116–121.
3. Федоров Ю. Н. О задачах по развитию инфраструктуры и технологии перевозочного процесса на Восточном полигоне для освоения прогнозных объемов перевозки : доклад генерального директора АО «ИЭРТ» 13 мая 2021 г. на заседании научно-технического совета ОАО «РЖД» по вопросу «О разработке и внедрении технологий интервального регулирования движения поездов для повышения пропускной способности на Восточном полигоне» под председательством генерального директора – председателя правления ОАО «РЖД» // АВП Технология : [сайт]. URL: <https://avpt.ru/news/oao-rzhd-prodolzhit-vnedrenie-tekhnologiy-intervalnogo-regulirovaniya> (дата обращения: 07.09.2022).
4. Розенберг Е. Н., Аношкин В. В. Перспективы роста пропускной способности участка // Железнодорожный транспорт. 2020. № 3. С. 4–7.
5. Румянцев С. В. Технические средства интервального регулирования // Локомотив. 2019. № 5. С. 39–42.
6. Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» до 2025 года // ОАО «РЖД» : [сайт]. URL: <http://www.rzd.ru/> (дата обращения: 29.05.2020).
7. Белькова Ю. Д., Симоченко А. С., Белоголов Ю. И. Современные системы интервального регулирования движения поездов // Молодая наука Сибири. 2021. № 2 (12). С. 97–102.
8. Левин Д. Ю. Диспетчерские центры и технология управления перевозочным процессом : учебное пособие. Москва : Маршрут, 2005. 759 с. ISBN 5-89035-274-1.
9. Белоголов Ю. И., Стецова Ю. М., Оленцевич А. А. Использование методов математического моделирования при управлении транспортными процессами на железной дороге // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2018. Т. 1. С. 145–148.
10. Симоченко А. С., Белоголов Ю. И. Организация движения поездов на участке Усть-Илимск – Хребтовая при внедрении системы «Анаконда» // Молодая наука Сибири. 2021. № 3 (13). С. 118–125.
11. Прокопьева Е. С., Фомин С. А., Панин В. В. Определение станционных и межпоездных интервалов при интервальном регулировании движения поездов // Железнодорожный транспорт. 2017. № 7. С. 20–23.
12. Белькова Ю. Д., Белоголов Ю. И. Построение графика движения поездов для участка Слюдянка I – Улан-Удэ при внедрении АБТЦ-МШ // Молодая наука Сибири. 2021. № 3 (13). С. 109–117.
13. Olentsevich V. A., Belogolov Yu. I., Grigoryeva N. N. Analysis of reliability and sustainability of organizational and technical systems of railway transportation process // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Bristol, 2020. P. 012061.
14. Макаров Н. М. Анализ систем интервального регулирования // Сборник трудов 79-й Международной студенческой научно-практической конференции РГУПС. Воронеж, 2020. С. 39–41.
15. Долгий А. И. О поэтапной реализации концепции внедрения технологий интервального регулирования движения поездов : доклад генерального директора АО «НИИАС» 13 мая 2021 г. на заседании научно-технического совета ОАО «РЖД» по вопросу «О разработке и внедрении технологий интервального регулирования движения поездов для повышения пропускной способности на Восточном полигоне» под председательством генерального директора – председателя правления ОАО «РЖД» // АВП Технология : [сайт]. URL: <https://avpt.ru/news/oao-rzhd-prodolzhit-vnedrenie-tekhnologiy-intervalnogo-regulirovaniya> (дата обращения: 07.09.2022).

References

1. Simochenko A. S., Belkova Yu. D., Belogolov Yu. I. The Anaconda system in comparison with existing systems of interval regulation of train traffic. *Young Science of Siberia*. 2021;(2)(12):102–107. (In Russ.).
2. Ratobylskaya D. V. Ways to increase the capacity of railway network sections based on simulation modeling. *Mathematical machines and systems*. 2010;(2):116–121. (In Russ.).
3. Fedorov Yu. N. On the tasks for the development of infrastructure and technology of the transportation process at the Eastern landfill for the development of transportation projected volumes: report of the Director General of JSC IERT on May 13, 2021 at a meeting of the Scientific and Technical Council of Russian Railways on the issue On the development and implementation technologies of interval regulation of train traffic to increase capacity at the Eastern polygon under the chairmanship of the General Director – Chairman of the Board of Russian Railways. *WUAS Technology: [site]*. URL: <https://avpt.ru/news/oao-rzhd-prodolzhit-vnedrenie-tehnologiy-intervalnogo-regulirovaniya>.
4. Rosenberg E. N., Anoshkin V. V. Prospects for the growth of the site capacity. *Railway transport*. 2020;(3):4–7. (In Russ.).
5. Rumyantsev S. V. Technical means of interval regulation. *Locomotive*. 2019;(5):39–42. (In Russ.).
6. Long-term development program of Russian Railways until 2025. *Russian Railways: [site]*. URL: <http://www.rzd.ru/>.
7. Belkova Yu. D., Simochenko A. S., Belogolov Yu. I. Modern systems of interval regulation of train traffic. *Young Science of Siberia*. 2021;(12):97–102. (In Russ.).
8. Levin D. Yu. Dispatch centers and technology of transportation process management: textbook. Moscow: Route; 2005. 759 p. ISBN 5-89035-274-1. (In Russ.).
9. Belogolov Yu. I., Stetsova Yu. M., Olentsevich A. A. The use of mathematical modeling methods in the management of transport processes on the railway. *Transport infrastructure of the Siberian region*. 2018;1:145–148.
10. Simochenko A. S., Belogolov Yu. I. Organization of train traffic on the Ust-Ilimsk – Khrebtovaya section during the introduction of the Anaconda system. *Young Science of Siberia*. 2021;(13):118–125. (In Russ.).
11. Prokopyeva E. S., Fomin S. A., Panin V. V. Determination of station and inter-train intervals during interval regulation of train traffic. *Railway transport*. 2017;(7):20–23. (In Russ.).
12. Belkova Yu. D., Belogolov Yu. I. Plotting train movements for the Slyudyanka I – Ulan-Ude section during the introduction of the ABTC-MS. *Young Science of Siberia*. 2021;(13):109–117. (In Russ.).
13. Olentsevich V. A., Belogolov Yu. I., Grigoryeva N. N. Analysis of reliability and sustainability of organizational and technical systems of railway transportation process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Bristol; 2020. P. 012061.
14. Makarov N. M. Analysis of interval control systems. *Proceedings of the 79th International Student Scientific and Practical Conference of the Rostov Transport University*. Voronezh; 2020. P. 39–41.
15. Dolgiy A. I. On the phased implementation of introducing technologies concept for interval regulation of train traffic: report of the Director General of JSC NIIAS on May 13, 2021 at a meeting of the Scientific and Technical Council of Russian Railways on the issue On the development and implementation of technologies for interval regulation of train traffic to increase throughput at the Eastern Landfill under the chairmanship of the General Director – Chairman of the Board of Russian Railways. *WUAS Technology: [site]*. URL: <https://avpt.ru/news/oao-rzhd-prodolzhit-vnedrenie-tehnologiy-intervalnogo-regulirovaniya>.

Информация об авторах

Ю. И. Белоголов – доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Иркутского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

В. Е. Гозбенко – профессор кафедры «Математика» Иркутского государственного университета путей сообщения, профессор кафедры управления на автомобильном транспорте Ангарского государственного технического университета, доктор технических наук.

Information about the authors

Yu. I. Belogolov – Associate Professor of the Operation Management Department, Irkutsk State Transport University, Candidate of Engineering.

V. E. Gozbenko – Professor of the Mathematics Department, Irkutsk State Transport University, Professor of the Management of Automobile Transport Department, Angarsk State Technical University, Doctor of Engineering.

Статья поступила в редакцию 08.09.2022; одобрена после рецензирования 26.09.2022; принята к публикации 10.10.2022.

The article was submitted 08.09.2022; approved after reviewing 26.09.2022; accepted for publication 10.10.2022.

TRANSPORT

Научная статья
УДК 625.031
doi 10.52170/1815-9265_2022_63_36

Моделирование пятна контакта, возникающего при взаимодействии колеса и рельса, для разных вариантов режима ведения грузового состава

Инна Леонидовна Парахненко^{1✉}, Дарья Александровна Гребнева²

^{1,2} Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

¹ lparahnenko@usurt.ru✉

² dashagrebnewa@yandex.ru

Аннотация. Для безопасного и плавного движения рельсового экипажа по железнодорожной колее необходимо эффективное взаимодействие колеса и рельса, которое напрямую зависит от технических (состояние пары «колесо – рельс»), динамических (конструкция и состояние железнодорожного пути), трибологических (величина трения на контактирующих поверхностях) и других многочисленных факторов. Возникающее при движении фрикционное сопротивление, особенно в кривых участках пути, влияет на износ колес и рельсов, повышение потребления электроэнергии, расстройство пути.

В статье представлены результаты моделирования изменения площади пятна контакта, возникающего между колесом и рельсом при движении грузового поезда. Основной акцент сделан на кривых участках с разными вариантами макрогеометрии пути, что дало возможность реализации нескольких режимов ведения при движении и вариантов износа профилей поверхности катания колесной пары. Данное направление является востребованным в настоящее время не только со стороны пути, но и для энергослужб и служб вагонного и локомотивного хозяйств, потому что на взаимодействие влияют как состояние контактирующих поверхностей, так и тяговые характеристики, развиваемые экипажем при движении.

Исследование проведено посредством имитационного моделирования, в программном комплексе движения грузового поезда. Взят действующий участок Свердловской железной дороги, смоделировано движение в двух направлениях. Рассмотрены два возможных состояния изношенности пары «колесо – рельс» и получены три основных режима ведения состава. Построены наглядные сравнительные диаграммы для каждого из рассматриваемых радиусов кривых участков пути. В заключение сделаны основные выводы и поставлены задачи, которые требуют решения и дальнейших исследований.

Ключевые слова: режим движения, кривая, тяга, профиль, пара «колесо – рельс», пятно контакта, площадь

Для цитирования: Парахненко И. Л., Гребнева Д. А. Моделирование пятна контакта, возникающего при взаимодействии колеса и рельса, для разных вариантов режима ведения грузового состава // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 4 (63). С. 36–43. DOI 10.52170/1815-9265_2022_63_36.

TRANSPORT

Original article

Modeling of the contact spot arising from the interaction of a wheel and a rail, for different variants of the freight train driving mode

Inna L. Parakhnenko^{1✉}, Darya A. Grebneva²

^{1,2} Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg, Russia

¹ lparahnenko@usurt.ru✉

² dashagrebnewa@yandex.ru

Abstract. For the safe and smooth movement of a rail carriage along a railway track, effective interaction of the wheel and the rail is necessary, which directly depends on technical (the condition of the wheel-rail pair), dynamic (the design and condition of the railway track), tribological (the amount of friction on the contacting surfaces) and numerous other factors. The frictional resistance that occurs during movement, especially in curved sections of the track, affects the wear of wheels and rails, increased electricity consumption, and disruption of the path.

The article presents the results of modeling the change in the area of the contact spot that occurs between the wheel and the rail during the movement of a freight train. The main emphasis is placed on curved sections with variants of the macro geometry of the path, which made it possible to implement several driving modes during movement and wear of the profiles of the pair. This direction is in demand at the present time, not only from the side of the track, but also for power services and services of the carriage and locomotive farms, because the interaction is influenced not only by the condition of the contacting surfaces, but also by the traction characteristics developed by the crew during movement.

The study was carried out by means of simulation modeling, in a software package, of the movement of a freight train movement. The current section of the Sverdlovsk Railway was taken; traffic in two directions was modeled. Two possible states of wear of the wheel-rail pair are considered and three main modes of train driving are obtained. Visual comparative diagrams are constructed for each of the considered radii of the curves of the sections of the path. In conclusion, the main conclusions are made and tasks are set that require solutions and further research.

Keywords: driving mode, curve, traction, profile, wheel-rail pair, contact spot, area

For citation: Parakhnenko I. L., Grebneva D. A. Modeling of the contact spot arising from the interaction of a wheel and a rail, for different variants of the mode of the freight train driving mode. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(63):36–43. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_63_36.

Введение

Повышение эксплуатационных характеристик элементов, взаимодействующих при движении состава по железнодорожному пути, в частности износостойкости, приведет к уменьшению эксплуатационных издержек железной дороги [1]. Для этого необходимо разработать меры организационного и технологического характера. На сети дорог ОАО «РЖД» совершенствуют профили поверхностей катания рельсов и колесных пар, изучают различные методы использования смазочных материалов (лубрикация). Постоянно разрабатывают и внедряют мероприятия по снижению коэффициента трения в трибопаре, направленные на увеличение ресурса системы. Ведется регулярный мониторинг и прогнозирование технического состояния железнодорожного пути [2, 3]. В основе всех мероприятий лежат теоретические исследования, выполненные отечественными учеными С. М. Андриевским, Н. Н. Меншутиным, Д. К. Миновым и др.

Ведущие специалисты ВНИИЖТ В. О. Певзнер и Ю. С. Ромен обратили внимание на то, что при взаимодействии колеса и рельса образуется пятно контакта, имеющее некоторую площадь, которая меняется при изменении радиусов кривизны контактируемых поверхностей. Также были замечены изменение и сдвиг площади контакта при движении экипажа по рельсовому пути. Выявленная закономерность чаще всего ведет к увеличению контактных давлений, а также к изменению места точек контакта [4–7].

Целью данной работы является изучение площади пятна контакта между колесом и рельсом при реализации разных вариантов режима движения грузового поезда в кривых участках железнодорожного пути, так как на данный момент нет однозначного ответа о влиянии силы тяги на динамику взаимодействия.

При движении состава по железнодорожному пути в основном выделяют три основных режима движения:

1) режим тяги, при котором действует сила F_k , а также силы сопротивления движению W :

$$F_d = F_k - W, \quad (1)$$

где F_d – режим тяги; F_k – действующая сила, W – сопротивление;

2) режим выбега, также известный как режим холостого хода, при котором на состав действуют лишь силы сопротивления движению:

$$F_d = -W; \quad (2)$$

3) режим торможения, при котором к действующим силам сопротивления движению подключается тормозная сила B_T :

$$F_d = -(W + B_T), \quad (3)$$

где B_T – тормозная сила.

Материалы и методы исследования

Для изучения площади пятна контакта при полученных на рассматриваемом участке (в системе комплексных расчетов «ИСКРА–ПТР») режимах ведения поезда моделирование проводилось в программном комплексе «Универсальный механизм» [8]. Была создана модель грузового поезда, максимально приближенного к реальному (вес 5 600 т, длина 920 м). Принята средняя скорость движения по данному участку – 60 км/ч. Модель поезда состоит из двух тяговых модулей (ВЛ80^с) и 60 полувагонов с нагрузкой 22,5 т на ось. В состав модели включены три 3D-вагона (в начале состава, в середине и в конце) [9]. Продольный профиль рассматриваемого участка по элементам представлен в таблице.

Для экспериментального моделирования приняты два состояния пары «колесо – рельс» (рис. 1): новое состояние профилей пары «колесо – рельс» (рельс – Р65new и колесо –

Макрогеометрия участка пути

Элемент продольного профиля	Длина элемента, м
Прямая вставка	350,72
Круговая кривая (правая): $R = 601$ м; $l_{1,2} = 90$ м; $l = 241,67$ м; $h = 125$ см	421,67
Прямая вставка	1 502,61
Круговая кривая (правая): $R = 592$ м; $l_{1,2} = 120$ м; $l = 560,26$ м; $h = 125$ см	800,26
Прямая вставка	662,66
Круговая кривая (левая): $R = 1\,011$ м; $l_{1,2} = 90$ м; $l = 304,53$ м; $h = 70$ см	484,53
Прямая вставка	303,63
Круговая кривая (правая): $R = 567$ м; $l_{1,2} = 120$ м; $l = 196,69$ м; $h = 135$ см	436,69
Прямая вставка	124,16
Круговая кривая (левая): $R = 594$ м; $l_{1,2} = 110$ м; $l = 481,11$ м; $h = 125$ см	701,11
Прямая вставка	737,96
Общая длина	6 526,00

* R – радиус; l_1 – длина входной кривой; l_2 – длина выходной кривой; l – длина кривой постоянного радиуса; h – возвышение.

а)

Новые профили

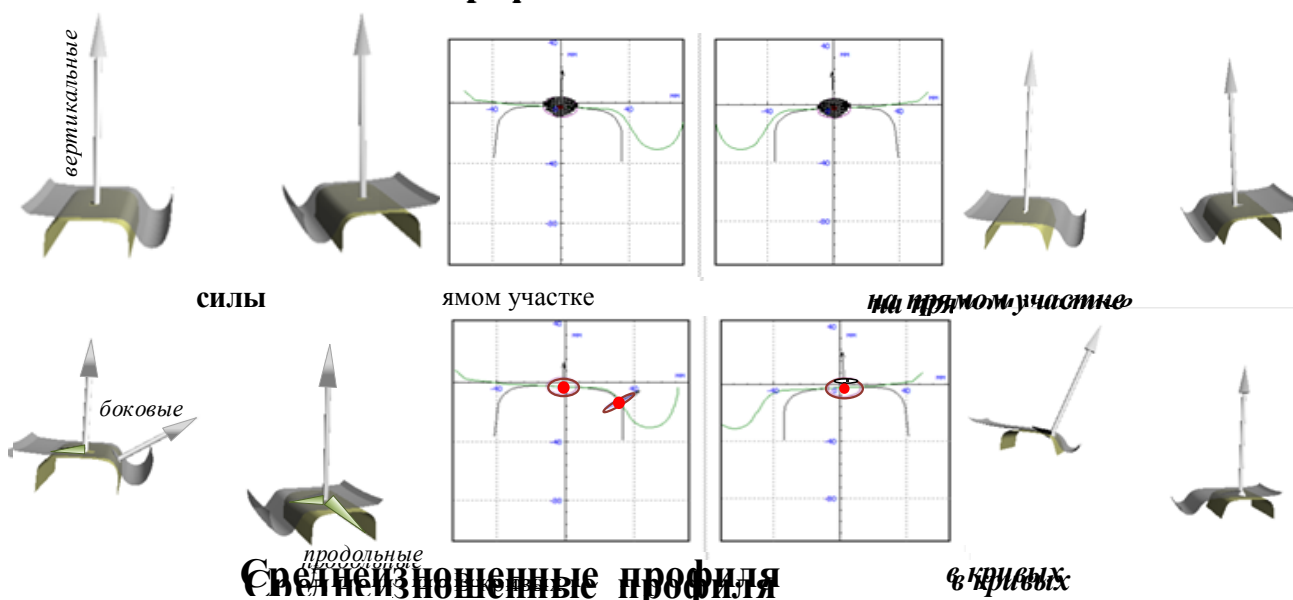


Рис. 1. Принятые варианты профилей пары «колесо – рельс»:
а – новые профили; б – среднеизношенные профили

newvagn); среднеизношенный профиль (рельс Р65 с имеющимся боковым износом не менее 4 мм – Р65worn) и колеса, имеющие отклонения от нового состояния (dmeti30) [10].

При моделировании движения по участку пути в кривых радиусами 601 и 592 м движение осуществлялось в режиме холостого хода, а при прохождении кривых радиусами 567 и 594 м состав двигался в режиме тяги. При прохождении составом пути не был использован режим торможения, поэтому был смоделирован проезд по исследуемому участку пути в обратном направлении. В результате при движении по кривой с радиусами 601 и 592 м состав движется в режиме тяги, а в кривой с радиусами 567 и 594 м смоделирован режим торможения (рис. 2).

Результаты исследования

После обработки результатов, полученных в ходе моделирования, построены диаграммы средних значений площадей пятна контакта для каждого колеса в колесной паре при трех рассматриваемых режимах движения грузового поезда (рис. 3–5). На рисунках приняты

следующие условные обозначения: к.п. – колесная пара, – новый профиль пары, – среднеизношенный профиль пары «колесо – рельс».

Анализ полученных результатов выявил, что в режиме холостого хода (см. рис. 3) площадь пятна контакта у пары, имеющей средне-сетевой износ профилей пары «колесо – рельс», независимо от радиуса, больше, чем при новом (не имеющем износа) состоянии профилей. При этом наибольшая площадь пятна контакта возникает в кривой радиусом 601 м у 4-й колесной пары. В кривой радиусом 592 м площадь пятна контакта пропорционально увеличивается у 2-й и 4-й колесных пар как для среднеизношенных, так и для новых профилей. Представленные диаграммы выявляют влияние профиля пары «колесо – рельс» на пятно контакта при движении в режиме холостого хода.

При прохождении экипажем кривых участков (с левым поворотом) железнодорожного пути в режиме тяги наибольшая площадь пятна контакта наблюдается на левом (внутреннем) колесе при неизношенном профиле

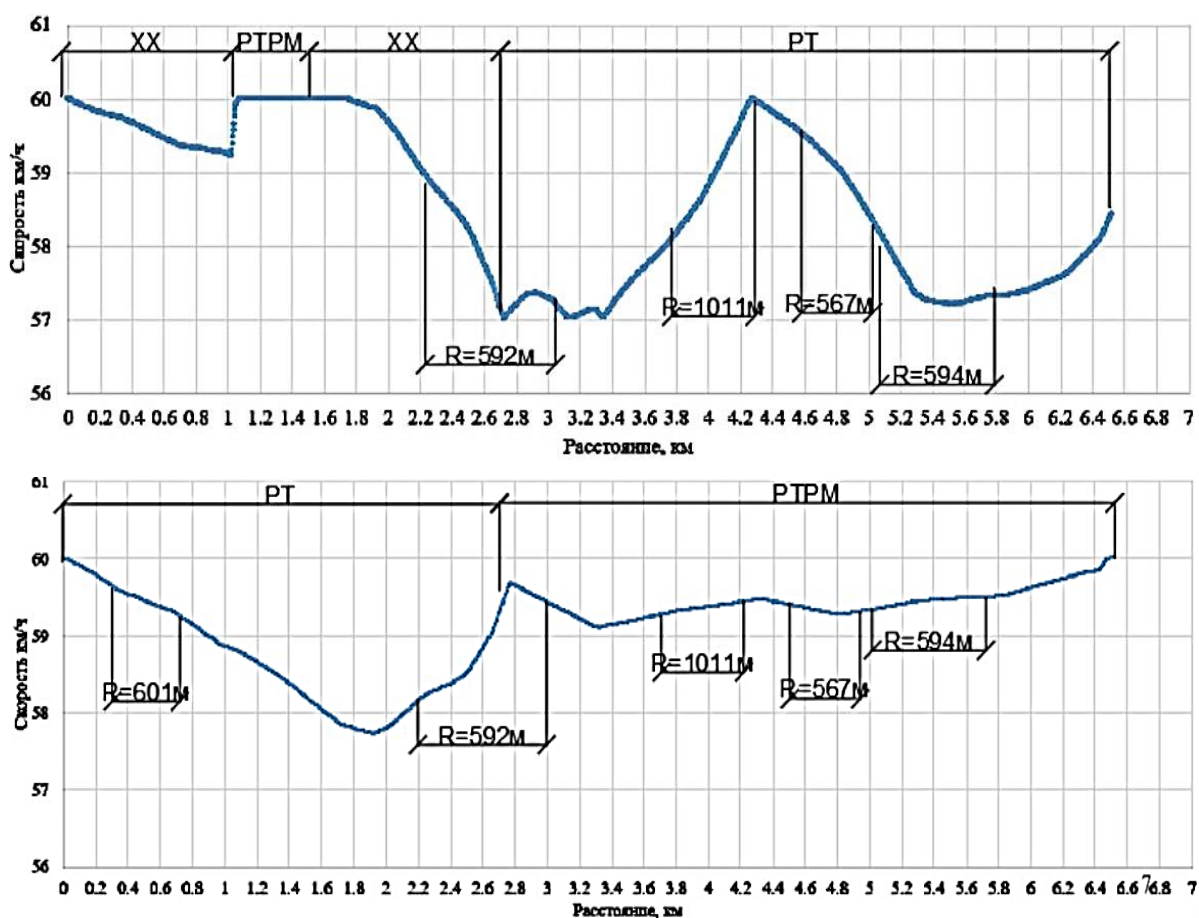


Рис. 2. Графики скорости на рассматриваемом участке с указанием режимов движения

пары. Разница значений у ведущих колесных пар (1-й и 3-й) составляет 14 % в кривой радиусом 1 011 м, на ведомых осях (2-й и 4-й колесных парах) площадь практически не от-

личается для рассмотренных вариантов. На правом колесе изменение профиля пары не влияет на площадь пятна контакта на поверхности катания рельса.

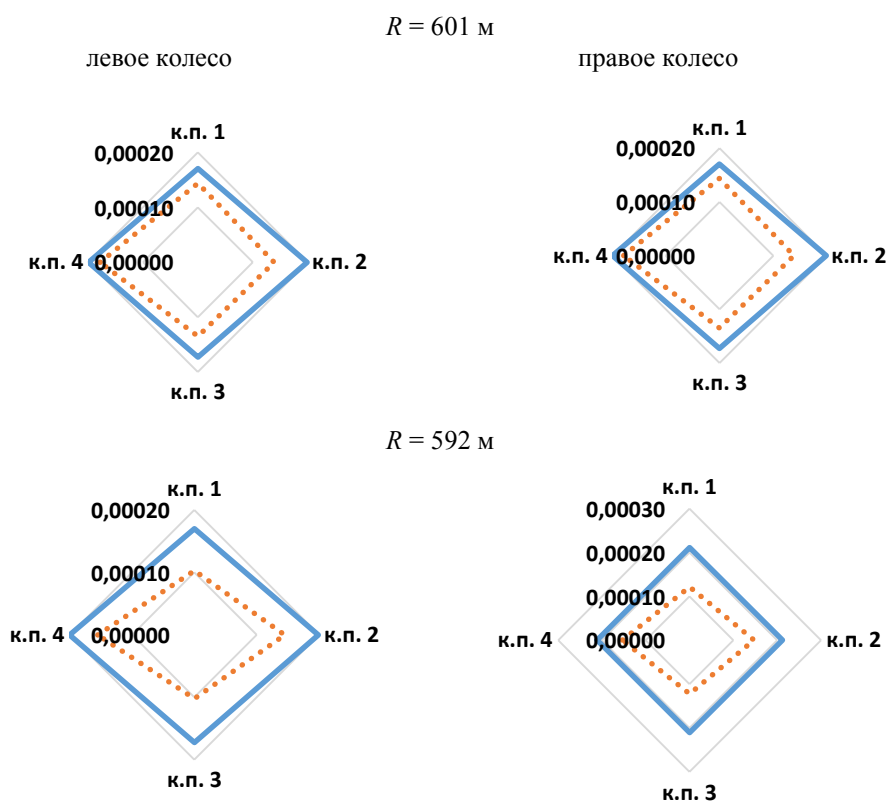


Рис. 3. Площадь пятна контакта в кривой в режиме холостого хода, м^2

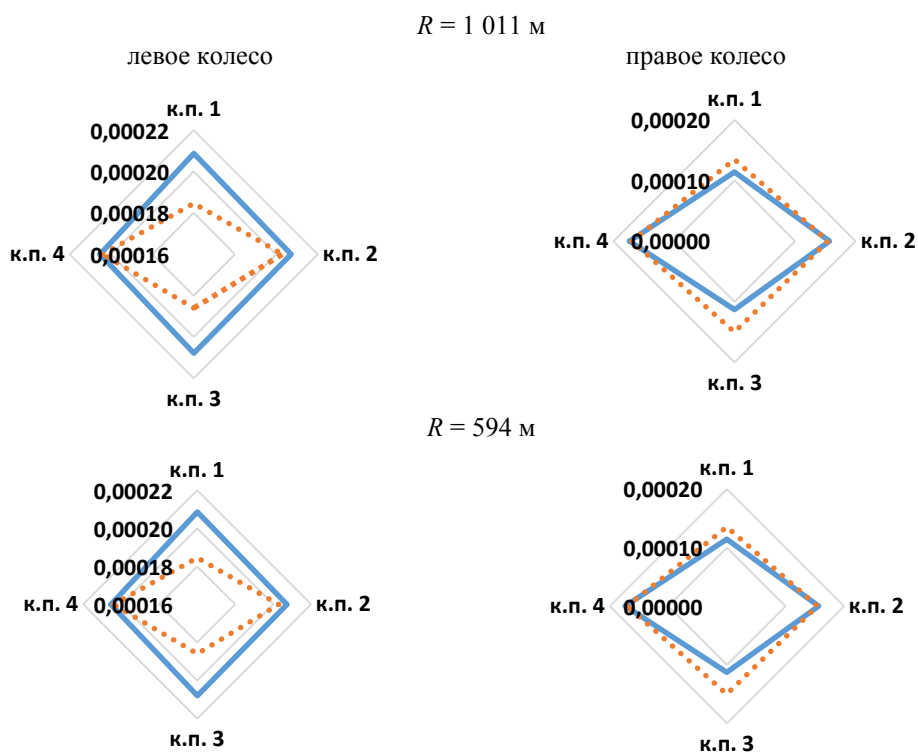


Рис. 4. Площадь пятна контакта в кривых в режиме тяги, м^2

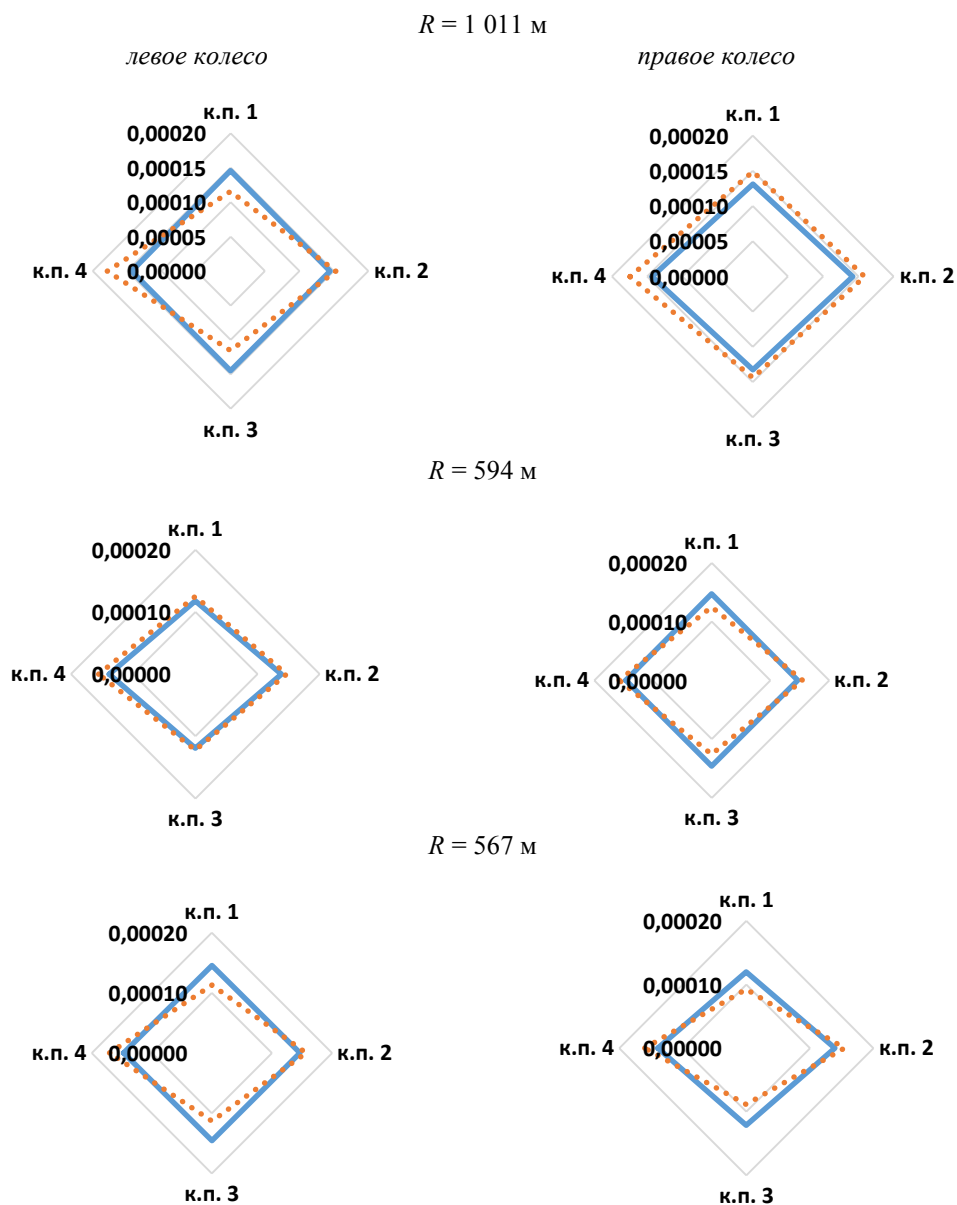


Рис. 5. Площадь пятна контакта в кривой в режиме торможения, м²

В режиме торможения в пологой кривой ($R = 1\,011\text{ м}$) максимальная площадь пятна контакта наблюдается на правом колесе при изношенном профиле (см. рис. 5). В левой кривой ($R = 594\text{ м}$) на колесе,двигающемся по внутренней нити на 1-й и 3-й колесных парах, площадь на 21 % больше при новом профиле. На ведомой 4-й оси, наоборот, площадь пятна контакта при износе профиля на 17 % выше. Аналогичная ситуация складывается и на наружной нити. В схожей по радиусу кривой ($R = 567\text{ м}$), но имеющей другие характеристики, большая площадь пятна контакта на поверхности катания наружной рельсовой нити (левое колесо) наблюдается при среднесетевом состоянии контактирующих поверхностей. При движении по нити, имеющей мень-

ший радиус, на ведущих осях площадь соприкосновения контактирующих поверхностей больше у новых колес, а на ведомых осях разница износа профилей практически не влияет на площадь.

Выводы

Результаты проведенных исследований дают возможность сказать, что на площадь пятна контакта пары «колесо – рельс» непосредственно влияют режим ведения подвижного состава, техническое состояние пары и макрогеометрия железнодорожного пути.

В режиме холостого хода максимальная площадь контакта, а значит, и устойчивость наблюдается при новом состоянии контактирующих поверхностей колеса и рельса. При движении с включенными двигателями (режим

тяги) на внутреннем рельсе пятно контакта больше при новом состоянии профилей, разница с изношенной парой составит более 10 %; при этом на рельсе, который установлен с возвышением, разница в площадях отсутствует. При движении состава по спуску пятно контакта больше (более чем на 20 %) на внутренней рельсовой нити при взаимодействии пары, имеющей износ.

Таким образом, сделать конкретный вывод, выделив один решающий фактор, пока не представляется возможным. Полученные результаты задают направление дальнейшим исследованиям, с расширением рассматриваемых параметров: микрогеометрия кривых, увеличение скоростей, вариативность продольного плана и профиля, увеличение нагрузки на ось и т. д.

Список источников

1. Износостойкость рельсовых и колесных сталей / Е. А. Шур, Н. Я. Бычкова, Д. П. Марков, Н. Н. Кузьмин // Трение и износ. 1995. Т. 16, № 1. С. 80–91.
2. Ларин Т. В. Об оптимальной твердости элементов пары трения «колесо – рельс» // Вестник ВНИИЖТ. 1965. № 3. С. 5–9.
3. О соотношении твердости рельсовой и колесной стали / А. М. Вихрова, Т. В. Ларин, Ю. М. Парышев, Л. С. Хургин // Вестник ВНИИЖТ. 1983. № 6. С. 34–38.
4. Ромен Ю. С. Факторы, обуславливающие процессы взаимодействия в системе колесо – рельс при движении поезда в кривых // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2015. № 1. С. 17–25.
5. Оценка работы пути, находящегося под воздействием продольных сил при реализации максимальных тяговых режимов при использовании электровозов с асинхронным тяговым приводом / В. О. Певзнер, В. В. Кочергин, В. В. Третьяков [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2020. Т. 79, № 4. С. 209–216.
6. Pevzner V., Romen U., Shapetko K. Control of energy aspects of track and rolling stock interaction // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 239. P. 01044.
7. Zharov I. A. Models of adhesion between the rail and the wheel // Journal of Friction and Wear. 2003. Vol. 24 (6). P. 594–600.
8. Моделирование динамики железнодорожных экипажей : [руководство пользователя «Универсальный механизм 8»]. 2016. URL: <http://www.universalmechanism.com/pages/index.php?id=3> (дата обращения: 19.09.2022).
9. Парахненко И. Л. Анализ сил взаимодействия в контакте «колесо – рельс» при различных трибологических вариантах // Транспорт Урала. 2019. № 2 (61). С. 54–57.
10. Парахненко И. Л. Исследование сил взаимодействия в контакте «колесо – рельс» при изменении трибологического состояния поверхности рельсов : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.22.06. Екатеринбург, 2021. 27 с.

References

1. Shur E. A., Bychkova N. Ya., Markov D. P., Kuzmin N. N. Wear resistance of rail and wheel steels. *Friction and wear*. 1995;16(1):80–91. (In Russ.).
2. Larin T. V. On the optimal hardness of the elements of the wheel – rail friction pair. *Bulletin of VNIIZHT*. 1965;(3):5–9. (In Russ.).
3. Vikhrova A. M., Larin T. V., Paryshev Yu. M., Khurgin L. S. On the ratio of rail and wheel steel hardness. *Bulletin of VNIIZhT*. 1983;(6):34–38. (In Russ.).
4. Romen Yu. S. Factors that cause the processes of interaction in the wheel–rail system when the train is moving in curves. *Bulletin of the Russian Scientific Research Institute of Railway Transport*. 2015;(1):17–25. (In Russ.).
5. Pevsner V. O., Kochergin V. V., Tretyakov V. V., Kolesnikov K. V., Polunina E. A. Work Evaluation of the track under the influence of longitudinal forces during the implementation of maximum traction modes when using electric locomotives with asynchronous traction drive. *Bulletin of the Russian Scientific Research Institute of Railway Transport*. 2020;79(4):209–216. (In Russ.).
6. Pevzner V., Romen U., Shapetko K. Control of energy aspects of track and rolling stock interaction. *MATEC Web of Conferences*. 2018;239:01044.
7. Zharov I. A. Models of adhesion between the rail and the wheel. *Journal of Friction and Wear*. 2003;24(6):594–600.

8. Modeling the dynamics of railway carriages. User manual Universal mechanism 8. 2016. (In Russ.). URL: <http://www.universalmechanism.com/pages/index.php?id=3>.

9. Parakhnenko I. L. Analysis of interaction forces in the wheel-rail contact with various tribological variants. *Transport of the Urals*. 2019;2(61):54–57. (In Russ.).

10. Parakhnenko I. L. Investigation of interaction forces in the wheel – rail contact with a change in the tribological state of the rail surface: abstract dissertation for a degree of Candidate of Engineering: 05.22.06. Yekaterinburg; 2021. 27 p. (In Russ.).

Информация об авторах

И. Л. Парахненко – доцент кафедры «Путь и железнодорожное строительство» Уральского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

Д. А. Гребнева – аспирант, ассистент кафедры «Путь и железнодорожное строительство» Уральского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

I. L. Parakhnenko – Associate Professor of the Track and Railway Construction Department, Ural State University of Railway Transport, Candidate of Engineering.

D. A. Grebneva – Postgraduate Student, Assistant of the Track and Railway Construction Department, Ural State University of Railway Transport.

Статья поступила в редакцию 08.10.2022; одобрена после рецензирования 08.11.2022; принята к публикации 14.11.2022.

The article was submitted 08.10.2022; approved after reviewing 08.11.2022; accepted for publication 14.11.2022.

ТРАНСПОРТ

Научная статья
УДК 656.25
doi 10.52170/1815-9265_2022_63_44

Декомпозиция основных бизнес-процессов и зоны формирования рисков железнодорожной транспортной системы в сфере грузовых перевозок

Наталья Васильевна Власова¹, Виктория Александровна Оленцевич²✉

^{1,2} Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия

¹ natalya.vlasova.76@list.ru

² olencevich_va@mail.ru✉

Аннотация. Формирование эффективного подхода к управлению рисками в железнодорожной транспортной системе позволит принимать оптимальные управленческие решения с учетом колебания грузопотока, нестабильности внешней среды, вероятности наступления определенных событий или обстоятельств, степени их влияния на достижение поставленных целей в области обеспечения безопасности и надежности работы объектов инфраструктурного комплекса.

Системы управления рисками должны включать следующие ключевые направления: идентификацию проблемы, оценку текущей ситуации, управление процессом, анализ результатов, выбор возможных вариантов воздействия на риск при условии сравнения их эффективности влияния, мониторинг реализации оптимального метода воздействия при учете внешних и внутренних факторов. Главной целью декомпозиции бизнес-процессов железнодорожной транспортной системы в сфере грузовых перевозок на отдельные производственные операции является выявление особо опасных зон формирования рисков по направлениям деятельности, что позволит обеспечить эффективную работу в области обеспечения безопасности перевозочного процесса и надежности работы технических устройств инфраструктурного комплекса. Проведенный авторами факторный анализ уровня безопасности перевозочного процесса на примере Восточно-Сибирской железной дороги позволил сформировать базу данных для построения графических зависимостей корневых причин, выявить ключевые взаимосвязи между различными факторами влияния на расстройство погрузки и крепления груза в пути следования.

По результатам проведенной декомпозиции в основных типовых бизнес-процессах определены сегменты обеспечения процессов и ключевые факторы риска в секторе организации грузовой работы. Предложена модель взаимосвязей причин возникновения транспортных происшествий на примере операций по исправлению нарушений погрузки размещения груза, перевозимого на открытом подвижном составе, позволяющая принимать оптимальные управленческие решения, вносить изменения в нормативные технические документы, направленная на предупреждение, сокращение количества рисков, минимизацию их последствий, сокращение непроизводительных затрат отрасли.

Ключевые слова: безопасность перевозочного процесса, причины расстройства погрузки и крепления груза, риск наступления событий, декомпозиция процесса

Для цитирования: Власова Н. В., Оленцевич В. А. Декомпозиция основных бизнес-процессов и зоны формирования рисков железнодорожной транспортной системы в сфере грузовых перевозок // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 4 (63). С. 44–52. DOI 10.52170/1815-9265_2022_63_44.

TRANSPORT

Original article

Decomposition of the main business processes and the risk formation zone of the railway transport system in the field of freight traffic

Natalya V. Vlasova¹, Victoria A. Olentsevich²✉

^{1,2} Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

¹ natalya.vlasova.76@list.ru

² olencevich_va@mail.ru✉

Abstract. The formation of an effective approach to risk management in the railway transport system will make it possible to make optimal management decisions, taking into account fluctuations in cargo traffic, instability of the external environment, the likelihood of certain events or circumstances, the degree of their impact on achieving the goals set in the field of ensuring the safety and reliability of the infrastructure complex facilities.

Risk management systems should include the following key areas: identification, analysis of results, assessment of the current situation, process management, selection of possible options for influencing risk, provided their effectiveness is compared, monitoring the implementation of the optimal method of influencing external and internal risk factors. The main purpose of the decomposition of the business processes of the railway transport system in the field of freight transportation into hotel production operations is to identify particularly dangerous areas of risk formation in the areas of activity, which will ensure effective work in the field of ensuring the safety of the transportation process and the reliability of the technical devices of the infrastructure complex. The factor analysis of the level of safety of the transportation process carried out by the authors on the example of the East Siberian Railway made it possible to form a database for constructing graphical dependencies of root causes, to identify key relationships between various factors influencing the disorder of loading and securing cargo en route.

Based on the results of the decomposition in the main typical business processes, the segments of process support and key risk factors in the cargo work organization sector were identified. A model of interrelations of the causes of transport accidents is proposed, using the example of operations to correct violations of loading and placement of cargo transported on open rolling stock, which allows making optimal management decisions, making changes to regulatory technical documents aimed at preventing, reducing the number of risks, minimizing their consequences, reducing unproductive costs of the industry.

Keywords: ensuring the safety of the transportation process, the reasons for the disorder of loading and securing cargo, the risk of events, process decomposition

For citation: Vlasova N. V., Olentsevich V. A. Decomposition of the main business processes and the risk formation zone of the railway transport system in the field of freight traffic. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(63):44–52. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_63_44.

Введение

С целью повышения уровня безопасности движения в железнодорожной транспортной системе необходимо активное вовлечение в деятельность по обеспечению безопасности перевозочного процесса всех подразделений и работников сектора грузовой работы, а также пользователей транспортными услугами, участвующих в подготовке и организации погрузки и крепления грузов в вагонах и контейнерах.

В рамках реализации поставленной цели необходим постоянный мониторинг проблемы на всех уровнях и обеспечение высокой эффективности работ в вопросах обеспечения безопасности перевозочного процесса, предупреждение и сокращение количества транспортных происшествий, снижение размера финансовых расходов и потерь, полученных в результате транспортных рисков, на основе сочетания стратегического и оперативного подходов управления, что может быть основано на соблюдении ряда принципов:

- внедрения политики в области обеспечения безопасности перевозочного процесса на всех уровнях;
- применения системного подхода к формированию количественных и качественных показателей по структурным подразделениям с учетом специфики их деятельности;
- составления прогнозных сценариев развития рисков;
- комплексного подхода к обучению и приобретению новых компетенций персоналом;

– повышения надежности организационно-технологических процессов, документирование информации и норм по безопасности движения [1–3].

Материалы и методы исследования

Критерием успешности деятельности железнодорожной транспортной системы в сфере обеспечения высокого уровня безопасности перевозочного процесса и надежности технических средств является выполнение установленных качественных и количественных показателей безопасности, что должно быть основано на принципе непрерывного улучшения результатов работы подразделений сектора грузовой работы и пользователей транспортными услугами и позволит проводить количественную оценку степени повышения эффективности.

Количественные показатели в области обеспечения уровня безопасности движения определяются в целом по грузовому сектору и по структурным подразделениям, входящих в него, с учетом количества транспортных происшествий и иных событий, связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта. В соответствии с [4] в качестве данного показателя выступает абсолютное количество транспортных происшествий и иных событий, связанных с нарушением правил безопасности движения.

Качественные показатели в области обеспечения безопасности движения определяются по грузовому сектору и по структурным

подразделениям, входящих в него, по всем основным технологическим процессам, связанным с обеспечением безопасности движения, с учетом показателей работы и уровнем повышения качества оказываемых транспортных услуг. Данным показателем для грузового сектора установлен показатель функциональной безопасности движения [4, 5].

Факторный анализ состояния уровня безопасности и надежности перевозочного процесса в секторе грузовой работы Восточно-Сибирской железной дороги (ВСЖД), проведенный авторами [6, 7], позволил сформировать базу данных для построения диаграммы анализа корневых причин расстройства погрузки и крепления груза в пути следования как одного из основных инструментов измерения, оценки, контроля и улучшения показателей безопасности (табл. 1).

Для анализа взаимосвязи между различными факторами причин расстройства погрузки и крепления груза в пути следования по ВСЖД

по итогам работы в 2019–2020 гг. использовалась диаграмма Парето (рис. 1).

В качестве основных факторов расстройства погрузки и крепления груза в пути следования за анализируемый период можно выделить:

- скрытые грузоотправителем дефекты размещения и крепления груза, которые заключаются чаще всего в применении грузоотправителем реквизита крепления, не соответствующего требованиям нормативных документов, а также нарушении технических условий размещения груза в вагонах и контейнерах;

- невыполнение должностных обязанностей работниками сектора грузовой и коммерческой работы, в качестве причины данного фактора необходимо отметить недостаточный опыт работы в данной сфере, халатность, невнимательность работников как со стороны железной дороги, так и со стороны грузоотправителя, основной целью которого является получение прибыли.

Таблица 1

Данные для анализа Искавы причин расстройства погрузки и крепления груза в пути следования

Причина	Количество отцепленных по указанной причине вагонов	Нарушения, %	Накопленный процент
Скрытые грузоотправителем дефекты размещения и крепления груза	19	35	35
Невыполнение должностных обязанностей	18	33	68
Применение грузоотправителем реквизита крепления, не соответствующего требованиям нормативных документов (техническим условиям размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах (ТУ), ГОСТам и др.)	17	31	99
Малый опыт работы (менее 1 года)	1	2	100



Рис. 1. Ключевые взаимосвязи между различными факторами причин расстройства погрузки и крепления груза в пути следования

Анализ причинно-следственных связей расстройства погрузки и средств крепления в вагонах и контейнерах производился с использованием диаграммы Исикавы (рис. 2).

Проанализировав рис. 2, видим, что основными причинами возникновения рисков ситуаций являются непредумышленные ошибочные действия персонала, имеющего как отраслевую принадлежность, так и дочерних и сторонних организаций, работающих с дорогой на договорной основе: невыполнение должностных обязанностей, неуклюжесть штата, незнание работниками, занятыми подготовкой и креплением грузов в вагонах и контейнерах, требований нормативной документации, опыт работы менее одного года. Снижение потерь времени из-за своевременного устранения негативных событий, вызванных человеческим фактором при выполнении данных технологических процессов, позволяет уменьшить производственные затраты и повысить безопасность движения.

Проведенный анализ позволил выделить три основных бизнес-процесса, связанных с обеспечением безопасности движения, сохранности вагонного парка и перевозимого груза, в которых формируются риски наступления событий, а также происшествий и инцидентов:

- погрузка вагонов (контейнеров);
- выгрузка вагонов (контейнеров);
- устранение коммерческих неисправностей грузов [6, 8, 9].

С целью выявления факторов риска в каждом процессе произведена декомпозиция процессов на операции: погрузка груза в вагон (контейнер), выгрузка груза из вагона (контейнера), устранение коммерческих неисправностей грузов (табл. 2).

Результаты исследования

По результатам проведенной декомпозиции в основных типовых бизнес-процессах определены сегменты обеспечения основных процессов и факторы риска в секторе грузовой работы Восточно-Сибирской железной дороги, которые в них формируются (табл. 3):

- управление производственными процессами;
- управление персоналом;
- управление инфраструктурой, техническими средствами и инвентарем строгого учета;
- управление технологической документацией;
- управление индикаторами раннего предупреждения.

Таблица 2

Декомпозиция процесса

Процесс	Декомпозиция
Погрузка груза в вагон (контейнер)	Подача порожнего вагона на грузовой фронт под погрузку
	Выдача тормозных башмаков для закрепления вагонов
	Определение годности вагонов под погрузку в коммерческом отношении
	Погрузка, размещение и закрепление груза в вагоне
	Коммерческий осмотр вагонов по отправлению. Приемка груза к перевозке
	Оформление документации при погрузке и размещении груза
	Возврат тормозных башмаков в места хранения
	Уборка погруженного вагона с грузового фронта
Выгрузка груза из вагона (контейнера)	Подача груженого вагона на грузовой фронт под выгрузку
	Выдача тормозных башмаков для закрепления вагонов
	Коммерческий осмотр груза
	Выгрузка груза (контейнера) из вагона
	Возврат тормозных башмаков в места хранения
	Уборка выгруженного вагона с грузового фронта
Устранение коммерческих неисправностей грузов	Подача вагонов на грузовой фронт под устранение коммерческих неисправностей
	Выдача тормозных башмаков для закрепления вагонов
	Коммерческий осмотр вагонов
	Операции по устранению коммерческих неисправностей
	Приемка размещения и крепления груза уполномоченными работниками станции
	Возврат тормозных башмаков в места хранения
	Уборка вагона с грузового фронта

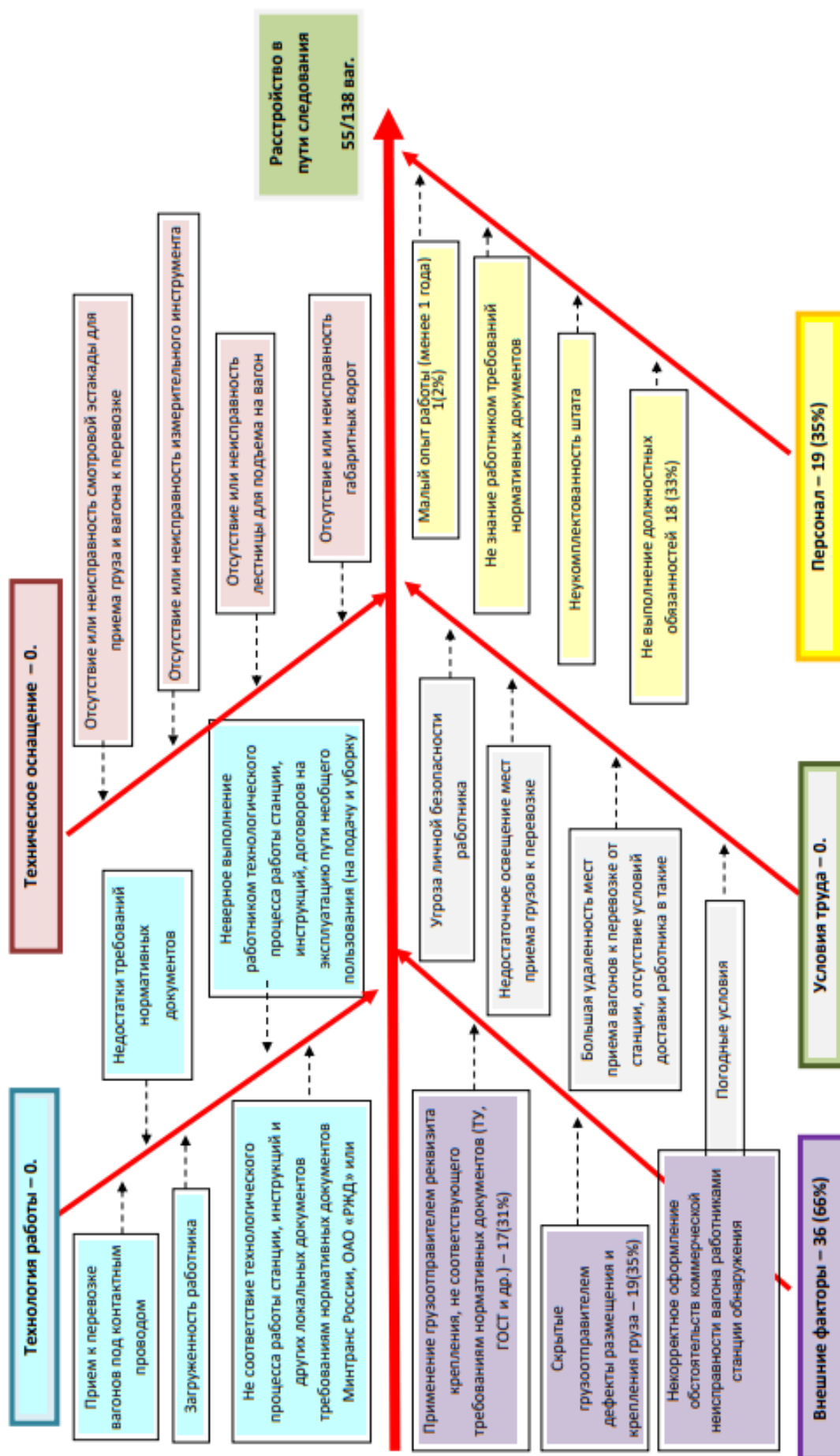


Рис. 2. Диаграмма причинно-следственных связей расстройств погрузки и средств крепления в вагонах и контейнерах

Факторы риска в сегментах обеспечения бизнес-процессов в структурных подразделениях сектора грузовой работы

Функциональный блок	Бизнес-процесс	Фактор риска
Управление производственными процессами	1. Соблюдение трудовой и производственной дисциплины	1. Ревизорские указания по нарушениям ТУ погрузки
		2. Нарушения ТУ погрузки (при погрузке)
		3. Нарушения ТУ погрузки (в пути следования)
		4. Нарушение Регламента многоступенчатого контроля
		5. Представления о нарушении погрузо-разгрузочных работ с опасными грузами
Управление персоналом	2. Профессиональная компетентность лиц, ответственных за погрузку, размещение, крепление грузов в вагонах и контейнерах, приемосдатчиков груза и багажа	6. Направление приемосдатчиков на внеочередную аттестацию
		7. Нарушение графика обучения приемосдатчиков
		8. Руководство погрузкой (прием к перевозке) с нарушением срока прохождения аттестации
		9. Руководство погрузкой (прием к перевозке) с нарушением срока медицинского освидетельствования
		10. Направление водителей на внеочередную аттестацию
	3. Профессиональная компетентность лиц, управляющих подъемными сооружениями, автотранспортом, дорожно-строительными машинами, контейнерными (грейферными) перегружателями	11. Документация по допуску к управлению техническими средствами
		12. Нарушения ПДД на железнодорожных переездах
		13. Управление техническими средствами с нарушением срока прохождения аттестации
		14. Управление техническими средствами с нарушением срока медицинского освидетельствования
		15. Управление автотранспортом без предрейсового медицинского осмотра
Управление инфраструктурой, техническими средствами и инвентарем строгого учета	4. Содержание железнодорожных путей, повышенных эстакад, мостов, железнодорожных переездов	16. Ревизорские указания по эксплуатируемым железнодорожным путям
		17. Эксплуатация железнодорожных путей с нарушениями, без принятия запретных мер
		18. Документация по эксплуатации железнодорожных путей
		19. Нарушение сроков устранения замечаний эксплуатируемых железнодорожных путей
		20. Эксплуатация железнодорожных путей с нарушениями, принятие запретных мер
	5. Содержание тормозных башмаков	21. Ревизорские указания по тормозным башмакам
		22. Изъятие тормозных башмаков из эксплуатации
		23. Документация по эксплуатации тормозных башмаков
		24. Утрата (хищение) тормозных башмаков
	6. Содержание подъемных сооружений, автотранспорта, дорожно-строительных машин, контейнерных (грейферных) перегружателей	25. Ревизорские указания по эксплуатируемым техническим средствам
		26. Документация по эксплуатации технических средств
		27. Управление автотранспортом с нарушением срока прохождения технического осмотра
		28. Эксплуатация кранов с нарушением срока прохождения освидетельствования
		29. Эксплуатация кранов с непройденным ежесменным обслуживанием
		30. Эксплуатация погрузчиков с нарушением срока прохождения технического осмотра
Управление технологической документацией	7. Содержание технологической документации	31. Ревизорские указания по технологическим процессам
		32. Отмена утвержденных эскизов (в процессе погрузки)
		33. Отмена утвержденных эскизов (в пути следования)
		34. Разработка технологических процессов и технологических карт
Управление индикаторами раннего предупреждения	8. Ревизорские указания, предписания, представления	35. Сроки устранения ревизорских указаний
	9. Устранение нарушений, выявляемых по мероприятиям внутреннего контроля	36. Невыполнение мероприятий по результатам ревизий

На основании сформированной модели взаимосвязей причин возникновения транспортных происшествий и иных событий, связанных с нарушением безопасности движе-

ния для грузового сектора и его структурных подразделений, определены факторы риска в области обеспечения безопасности движения поездов (рис. 3) [10–12].

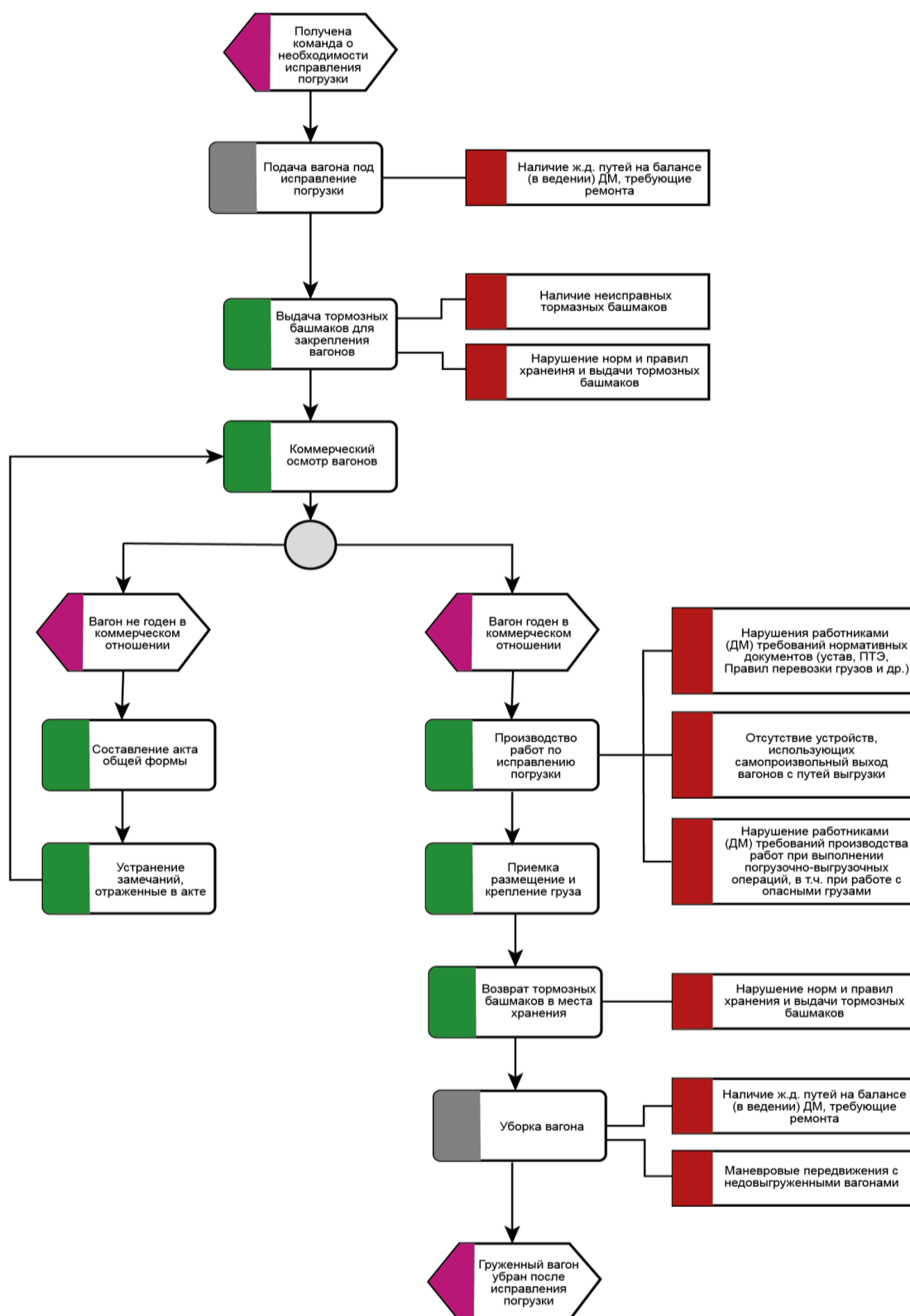


Рис. 3. Модель взаимосвязей причин возникновения транспортных происшествий и иных событий (на примере операций по исправлению технологии погрузки размещения груза в вагоне)

Выводы

Декомпозиция бизнес-процессов в сфере функционирования предприятий и структурных подразделений в области грузовых перевозок на отдельные элементы позволяет выявить наиболее опасные факторы формирования рисков по направлениям деятельности с целью обеспечения безопасности и бесперебойности перевозочного процесса.

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. С целью установления причин, существующих (фактических) несоответствий, особое внимание при их анализе целесообразно обращать на нормативную документацию, определяющую требования к процессам (или продукции) в рамках организации грузовой работы, а также наличие применимых ресурсов, включая подготовку персонала, его опыт и компетентность (квалификацию).

Негативные тенденции, установленные в результате анализа, рассматриваются с точки зрения их изменения в лучшую сторону.

2. Причины несоответствий могут быть во взаимоотношениях с другими подразделениями на уровне как пользователей транспортными услугами, дистанции, так и исполнителя и организации его рабочего места.

3. При проведении анализа необходимо также учитывать специфику несоответствия с целью определения наиболее эффективных корректирующих действий, которые могут включать:

- внесение изменений в существующие внутренние руководящие документы;
- разработку новых внутренних руководящих документов;
- действия по повышению компетентности (квалификации) персонала;
- внедрение и освоение новых технологий, технических средств.

Список источников

1. Российские железные дороги : [сайт]. URL: <http://www.rzd.ru> (дата обращения: 29.08.2022).
2. Грузы готовы ехать. ОАО «РЖД» прогнозирует рекордные экспортные перевозки в 2022 году // Gudok.ru : [сайт]. URL: <https://gudok.ru/content/freighttrans/1593862/> (дата обращения 29.08.2022).
3. Стратегия развития холдинга «РЖД» на период до 2030 года // ОАО «РЖД» : [сайт]. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=804> (дата обращения: 29.08.2022).
4. Положение о классификации, порядке расследования и учета транспортных происшествий и иных событий, связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта : утверждено приказом Минтранса России от 18 декабря 2014 г. № 344 // Система «Гарант» : [сайт]. URL: https://base.garant.ru/70878628/#block_34 (дата обращения: 29.08.2022).
5. Методика оценки функциональной безопасности в Центральной дирекции по управлению терминально-складским комплексом : утверждена приказом от 11 февраля 2022 г. № ЦМ-59.
6. Оленцевич В. А., Гозбенко В. Е. Методическое и программное обеспечение прогнозирования значений уровня безопасности функционирования железнодорожной транспортной системы : монография. Иркутск, 2019. 172 с.
7. Automated calculation method effect values in load securing elements fixed on a rolling stock / N. V. Vlasova, V. A. Olentsevich, V. Yu. Konyukhov, D. A. Lysenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Seria "International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS 2020)". Novosibirsk, 2021. P. 012042
8. Влияние отказов технических средств на задержку поездов / В. Д. Верескун, В. С. Воробьев, И. В. Яньшина, И. Б. Репина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2019. № 4 (76). С. 42–48.
9. Turanov K., Ruzmetov Yu., Vlasova N. Calculating cargo securing elements on a railway platform under the impact of a spatial force system // E3S Web of Conferences. Innovative Technologies in Environmental Science and Education (ITESE 2019). Divnomorskoe, 2019. Vol. 135. P. 02006.
10. Носков С. И. Построение свертки критериев адекватности регрессионных моделей // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2022. № 1 (41). С. 73–81.
11. Носков С. И., Хоняков А. А. Применение функции риска для моделирования экономических систем // Южно-Сибирский научный вестник. 2020. № 5 (33). С. 85–92.
12. Носков С. И., Протопопов В. А. Многокритериальная оценка уровня уязвимости объектов транспорта // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2016 : материалы Международной научно-практической конференции. СПб. : Институт проблем транспорта, 2016. С. 98–102.

References

1. Russian Railways: [site]. (In Russ.). URL: <http://www.rzd.ru>.
2. Loads are ready to go. Russian Railways predicts record export traffic in 2022. *Gudok.ru: [site]*. (In Russ.). URL: <https://gudok.ru/content/freighttrans/1593862/>.
3. Development strategy of the Russian Railways Holding for the period up to 2030. *Russian Railways: [site]*. (In Russ.). URL: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=804>.
4. Regulations on the classification, procedure for investigating and recording transport accidents and other events related to violation of the rules for traffic safety and operation of railway transport, approved by order of the Transportation Department of Russia dated December 18, 2014 no. 344. (In Russ.).
5. The methodology for assessing functional safety in the Central Directorate for the Management of the Terminal and Warehouse Complex was approved by Order No. TsM-59 dated February 11, 2022. (In Russ.).
6. Olentsevich V. A., Gozbenko V. E. Methodical and software support for predicting the values of the safety level of the functioning of the railway transport system. Monograph. Irkutsk; 2019. 172 p. (In Russ.).
7. Vlasova N. V., Olentsevich V. A., Konyukhov V. Y., Lysenko D. A. Automated calculation method effect values in load securing elements fixed on a rolling stock. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Seria International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS 2020)*. Novosibirsk; 2021. P. 012042.
8. Vereskun V. D., Vorobyov V. S., Yanshina I. V., Repina I. B. Influence of technical equipment failures on train delays. *Bulletin of the Rostov State Transport University*. 2019;(76):42–48. (In Russ.).
9. Turanov K., Ruzmetov Y., Vlasova N. Calculating cargo securing elements on a railway platform under the impact of a spatial force system. *E3S Web of Conferences. Innovative Technologies in Environmental Science and Education (ITESE 2019)*. Divnomorskoe; 2019. Vol. 135. P. 02006.
10. Noskov S. I. Construction of convolution criteria for the adequacy of regression models. *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2022;(41):73–81. (In Russ.).
11. Noskov S. I., Khonyakov A. A. Application of the risk function for modeling economic systems. *South Siberian Scientific Bulletin*. 2020;(33):85–92. (In Russ.).
12. Noskov S. I., Protopopov V. A. Multi-criteria assessment of the transport facilities vulnerability level. *Russian transport: problems and prospects – 2016. Materials of the International scientific and practical conference*. St. Petersburg; 2016. P. 98–102. (In Russ.).

Информация об авторах

Н. В. Власова – доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Иркутского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

В. А. Оленцевич – доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Иркутского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

Information about the authors

N. V. Vlasova – Associate Professor of the Operation Management Department, Irkutsk State Transport University, Candidate of Engineering.

V. A. Olentsevich – Associate Professor of the Operation Management Department, Irkutsk State Transport University, Candidate of Engineering.

Статья поступила в редакцию 12.10.2022; одобрена после рецензирования 05.11.2022; принята к публикации 16.11.2022.

The article was submitted 12.10.2022; approved after reviewing 05.11.2022; accepted for publication 16.11.2022.

TRANSPORT

Научная статья
УДК 625.097
doi 10.52170/1815-9265_2022_63_53

Исследование влияния формы поверхности навалочных грузов на выдувание при транспортировке

Елена Дмитриевна Псеровская^{1✉}, Роман Андреевич Овчинников²

^{1,2} Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

¹ eldp-55@yandex.ru✉

² roma.r1999@mail.ru

Аннотация. Транспортировка навалочных грузов, особенно угля, на открытом подвижном составе является важной составляющей прибыли холдинга «Российские железные дороги». Проблема обеспечения сохранности навалочных грузов при перевозке является не только коммерческой (недостача груза), но и экологической: выдувание угольной пыли приводит к загрязнению окружающей среды, почвы, балласта и других объектов железнодорожной инфраструктуры, что ухудшает нормальную работу устройств автоматики на перегонах и станциях, следовательно, негативно сказывается на безопасности движения поездов и маневровой работы.

Статья посвящена рассмотрению текущего состояния решения проблемы выдувания навалочных грузов, в частности угля. Изучены требования нормативных документов в части подготовки навалочных грузов к перевозке и к форме их поверхности в кузове вагона. Произведен анализ результатов опытных перевозок углей и имеющихся мероприятий по сокращению потерь от выдувания. На основе моделирования произведена оценка влияния допускаемых форм поверхности груза на интенсивность его выдувания и определения физико-механических свойств угля, обуславливающих форму его поверхности при погрузке, установлена недостаточная проработанность теоретической базы в решении проблемы выдувания угля в текущих условиях перевозки. Определены направления ее совершенствования.

Практическая значимость выполненной работы заключается в возможности использования результатов исследования для решения грузоотправителями угля практических задач совершенствования мероприятий по подготовке груза к перевозке. Предложенные методические рекомендации по снижению потерь угля от выдувания позволят минимизировать расходы грузополучателей на приобретение дополнительного объема груза (с учетом выдувания), аренды или приобретения дополнительного числа вагонов для его перевозки, а также возможные издержки перевозчика, связанные с компенсацией ущерба от загрязнения угольной пылью окружающей природной среды.

Ключевые слова: транспортировка угля в полувагонах, выдувание угля, форма поверхности угля в вагоне, аэродинамика полувагона с грузом, физико-механические свойства углей

Для цитирования: Псеровская Е. Д., Овчинников Р. А. Исследование влияния формы поверхности навалочных грузов на выдувание при транспортировке // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 4 (63). С. 53–61. DOI 10.52170/1815-9265_2022_63_53.

TRANSPORT

Original article

Influence investigation of bulk cargo surface shape on blowing during transportation

Elena D. Pserovskaya^{1✉}, Roman A. Ovchinnikov²

^{1,2} Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

¹ eldp-55@yandex.ru✉

² roma.r1999@mail.ru

Abstract. The transportation of bulk cargo, especially coal, on open rolling stock, is an important component of the profit of the Holding Company JSC Railways. The problem of ensuring the safety of bulk cargo during transportation is not only commercial (shortage of cargo), but also environmental: blowing coal dust leads to pollution of the environment, soil, ballast and other railway infrastructure facilities, which worsens the normal

operation of automation devices at stages and stations, therefore, negatively affects the safety of trains and shunting works.

The article is aimed on present condition consideration of bulky goods blowing-out, more specifically of coal. Results of empirical experiences transportation of coal, as well as current operations to reduce coal losses due to blow-out are carried out. Requirements of normative documents about bulky goods preparation for transportation and its surface form in car are studied. Deficient elaboration of theoretic base of coal blowing-out problem solution in current transportation conditions is investigated, as well as ways to develop the base are determined according to derived assessment of enable forms of freight surface on intensity of its blowing-out, also according to recognition of physical and mechanical properties of coal, which specify surface form of coal after its loading.

The practical significance of the work performed lies in the possibility of using the results of the study to solve practical problems by coal shippers to improve measures to prepare cargo for transportation. The proposed methodological recommendations for reducing coal shippers from blowing will minimize the costs of consignees for the purchase of an additional volume of cargo (including blowing), rent or purchase of an additional number of wagons for its transportation, as well as the possible costs associated with compensation for damage from environmental pollution of coal dust.

Keywords: coal transportation in open-top cars, coal blow-out, coal surface form in open-top car, aerodynamics of open-top car with freight, physical and mechanical properties of coal

For citation: Pserovskaya E. D., Ovchinnikov R. A. Influence investigation of bulk cargo surface shape on blowing during transportation. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(63):53–61. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_63_53.

Введение

Перевозка угля является важнейшей составляющей в работе железнодорожного транспорта России: в период с января по июнь 2022 г. на сети дорог ОАО «РЖД» погружено 176,2 млн т каменных углей, что составляет 28,65 % от общего объема погрузки [1]. Значительная часть угля перевозится на открытом подвижном составе, так как данный способ транспортировки является наиболее дешевым. Однако он не исключает потери угля от просыпания через конструктивные зазоры кузова полувагона, а также от выдувания.

В настоящее время в результате более глубокого обогащения каменного угля и железорудного сырья к перевозке стали предъявлять концентраты с фракциями от нескольких микрон до 1 мм. Все это привело к значительному росту потерь сыпучих грузов [2]. Потери угля носят негативный характер не только в связи с утратой грузовладельцем оплаченного угля, но и вследствие проблем, возникающих у владельца инфраструктуры из-за загрязнения балластной призмы угольной пылью. В местах начала следования угольных маршрутов в балласте эксплуатируемых путей содержится от 600 до 900 т угля на один погонный километр пути [3, с. 82], что ухудшает дренажные свойства балласта и нормальную работу рельсовых цепей. Угольная пыль в общем объеме загрязнителей балласта занимает в среднем 11 % [4], что существенно сокращает срок его эксплуатации между средними ремонтами пути. Кроме того, в экологическом плане происходит загрязнение

воздуха и почвы, что приносит вред здоровью людей и окружающей среде. Актуальность рассматриваемой проблемы обусловила объектно-предметную область, цель и задачи настоящей работы.

Объект исследования – транспортировка угля на открытом подвижном составе.

Предмет – проблема выдувания угля при его транспортировке на открытом подвижном составе.

Цель работы – оценить влияние формы поверхности угля, загруженного ниже уровня бортов полувагона, на подверженность выдуванию.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач:

- изучить требования нормативных документов в части подготовки навалочных грузов к перевозке и к форме их поверхности в кузове вагона;

- выполнить анализ ранее проведенных исследований, результатов опытных перевозок углей и на их основании определить параметры, оказывающие наибольшее влияние на размеры потерь от выдувания;

- выполнить моделирование воздушных потоков по поверхности груза в полувагоне при движении поезда;

- произвести оценку влияния допускаемых форм поверхности груза на интенсивность выдувания.

Анализ действующей редакции Технических условий размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах (далее – ТУ) показал, что конкретных требований к параметрам по-

верхности груза не предъявляется, лишь указано: «Поверхность груза после погрузки на открытый подвижной состав должна быть разровнена, а при необходимости и уплотнена» [5, п. 5.1]. Однако в Технических условиях погрузки и крепления грузов, действовавших с 1969 до 1988 г. [6] и с 1988 по 2003 г. [7], рекомендованы оптимальные значения параметров «шапки» угля: H – высота относительно уровня верхней обвязки кузова вагона в пределах 200–300 мм; h – возвышение стен кузова над основанием «шапки», $h = 50$ мм; α – угол наклона боковых граней «шапки» относительно горизонтальной плоскости, $\alpha = 20\text{--}25^\circ$ [8, с. 36–37]. Формировать «шапку» груза с данными параметрами было предложено при помощи катков-уплотнителей со следующими параметрами: длина катка – 2 650 мм, длина цилиндрической части – 1 590 мм, длина конусных концов – 530 мм, угол наклона конусных концов – $20\text{--}25^\circ$ [9, с. 142]. Примечательно, что данные параметры отражены и в действующем ГОСТе на обеспечение сохранности подвижного состава при производстве погрузочно-разгрузочных работ (ПРР) [10, п. 5.8.2].

Согласно приложению 3 к Соглашению о Международном железнодорожном грузовом сообщении (СМГС), допускается не разравнивать поверхность груза и не формировать «шапку» обтекаемой (трапецевидной) формы: «Поверхность груза, содержащего мелкие частицы, высота погрузки которого превышает высоту стен вагона (с «шапкой»), должна быть разровнена и уплотнена» [11]. При этом уточнен параметр h – не менее 100 мм. Наиболее важное допущение по форме поверхности угля заключается в том, что возможна погрузка угля с конусовидной поверхностью, если высота погрузки не превышает высоту стен вагона (рис. 1). При этом конусы могут отличаться как по форме, так и по высоте.

Данные допущения обусловлены, с одной стороны, особенностями технологии погрузки угля (при бункерной – прерывистое передвижение полувагонов по фронту погрузки из условия равномерного распределения нагрузки на тележки, зависящее от квалификации оператора погрузки угля и физико-механических свойств угля, таких как объемная плотность, сыпучесть, угол естественного откоса и др.) и

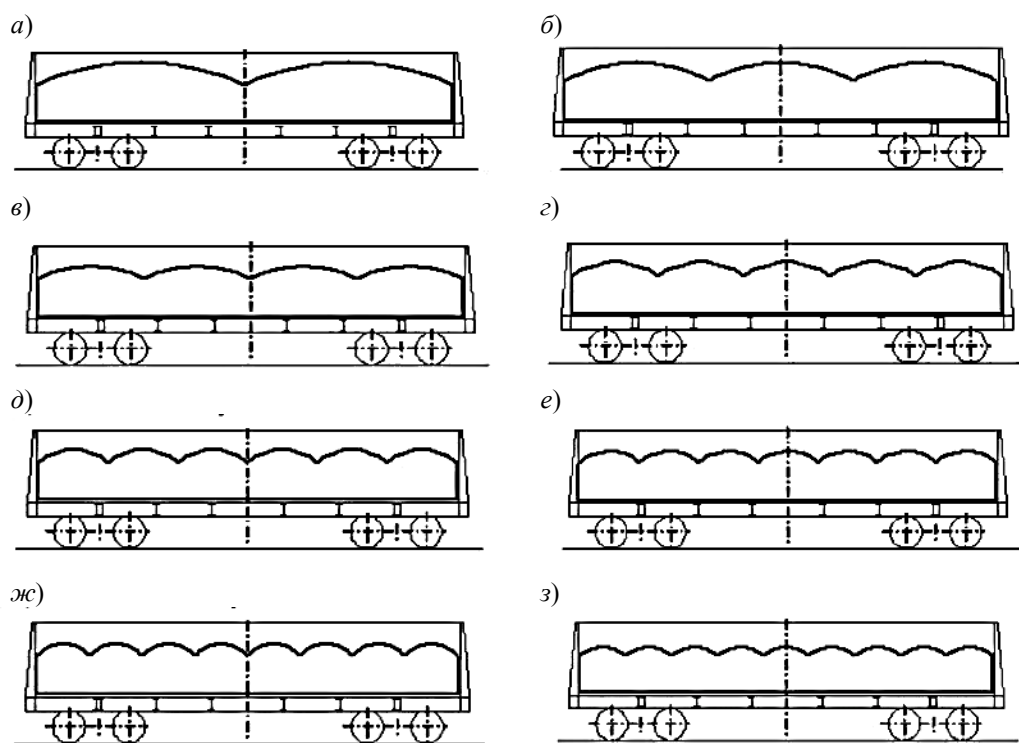


Рис. 1. Допускаемые СМГС формы поверхности груза при погрузке ниже уровня стен [11]:
 а – с двумя конусами; б – с тремя конусами; в – с четырьмя конусами; г – с пятью конусами;
 д – с шестью конусами; е – с семью конусами; ж – с восемью конусами; з – с девятью конусами

обеспечением сохранности подвижного состава при производстве ПРР: каток-уплотнитель не должен опускаться ниже уровня верхней обвязки и контактировать с ней [10, п. 5.8.2] (при расстоянии от поверхности угля до верхней обвязки, равном или превышающим диаметр конусных частей катка). Кроме того, разравнивание и уплотнение угля катком при погрузке ниже уровня стен значительно затруднено вероятностью повреждения лесных скоб. С другой стороны, допущения по форме поверхности (см. рис. 1) могут быть обусловлены тем, что при разработке ТУ (прил. 3 к СМГС) отсутствовали данные о влиянии формы поверхности груза, загруженного ниже уровня бортов, на интенсивность его выдувания.

Анализ опубликованных данных по теме исследования позволил отметить достаточную проработку вопроса снижения потерь угля от выдувания при его погрузке выше уровня стен кузова вагона (с «шапкой») [12–14], при этом исследований и рекомендаций по перевозкам навалочных грузов, загруженных ниже уровня бортов, практически нет.

Исследования по определению размера течи в зависимости от расстояний перевозки показали, что потери каменного угля в начале перевозки велики, но по мере удаления от углепогрузочного района они снижаются. Таким образом, наибольшую экологическую нагрузку от потерь груза при транспортировке испытывают регионы, расположенные на расстоянии до 1 000 км от углепогрузочных станций. Опытные перевозки показали, что при перевозке углей мелких фракций (0–6 мм) потери составляют от 839 до 1 826 кг/ваг. в зависимости от расстояния, причем доля потерь угля от просыпания составляет 45 %, а от выдувания – 55 % [2]. Если первая составляющая потерь зависит от качества подвижного состава, то устранение второй составляющей требует исследования влияния множества внешних (условия перевозки угля: параметры подвижного состава, железнодорожной инфраструктуры, климатических особенностей и времен года и др.) и внутренних (физико-механические свойства марок и фракций углей) факторов.

Особенностью условий перевозок грузов в настоящее время является обновление парка вагонов, в частности введение в эксплуатацию

инновационных полувагонов с улучшенными характеристиками (увеличенные грузоподъемность и объем кузова). Таким образом, при перевозке угля в разных типах полувагонов значительно варьируется высота погрузки. Если рассматривать загрузку полувагона углем мелких фракций (0–50 мм), а именно такие угли подвержены наибольшему выдуванию, то их погрузка осуществляется ниже уровня стен кузова и расстояние от поверхности груза до верхней обвязки в зависимости от типа вагона колеблется в пределах от 371 до 885 мм.

Методы исследования

Для исследования влияния формы поверхности груза, погруженного ниже уровня бортов, разработана виртуальная модель полувагона с углем. Созданная модель имеет сходные параметры с реальными условиями транспортировки груза, а именно 3D-модель кузова полувагона модели 12-9853 с погруженным в него углем марки АШ (0–6 мм) с различной конфигурацией поверхности, допускаемой в СМГС. Высота погрузки определена с учетом значения объемной плотности угля марки АШ 1,15 т/м³ [9, с. 50] следующим образом:

а) найден загружаемый объем угля V_3 , м³, исходя из данных о грузоподъемности полувагона G , т, и объемной плотности угля γ , т/м³, по формуле

$$V_3 = \frac{G}{\gamma}; \quad (1)$$

б) рассчитана высота погрузки угля:

$$h_3 = \frac{V_3}{ab} \cdot 10^9, \quad (2)$$

где a и b – внутренние размеры длины и ширины кузова полувагона соответственно, мм;

в) установлена разница между высотой стен кузова полувагона $h_{ст}$ и рассчитанной высотой погрузки угля:

$$\Delta h = h_{ст} - h_3. \quad (3)$$

При погрузке 75 т угля марки АШ в инновационный полувагон 12-9853:

$$V_3 = \frac{75}{1,15} = 65,22 \text{ м}^3,$$

$$h_3 = \frac{65,22}{12\,771 \cdot 2\,922} \cdot 10^9 = 1\,748 \text{ мм},$$

$$\Delta h = 2360 - 1748 = 612 \text{ мм}.$$

Таким образом, груз находится ниже уровня стен вагона с учетом равномерного заполнения кузова (ровной поверхности груза).

При задании конусовидной поверхности высота погрузки несколько изменялась исходя из условия сохранения рассчитанного объема груза (путем корректировки 3D-тела в графическом редакторе и измерения его объема). Высота конусов была принята 400 мм.

Однако необходимо отметить, что в созданной модели принято следующее допущение – не учитывались отдельные параметры груза, оказывающие влияние на формирование формы поверхности:

- влажность груза, которая влияет на текучесть, коэффициент внутреннего трения, смерзаемость, сводообразование, комкуемость и др. [15];
- угол естественного откоса;
- сыпучесть материала, которая характеризуется коэффициентом внутреннего трения сыпучего материала.

Начальное сопротивление сдвигу растет при повышении влажности и наличии сыпучих материалов мелких фракций, однако для смесей сыпучих материалов без пылевидных или порошкообразных фракций увлажнение не вызывает существенного повышения связности [16]. Поэтому вышеперечисленные параметры планируется учесть в дальнейших исследованиях при разработке рекомендаций по форме поверхности груза.

Численная оценка влияния формы поверхности на интенсивность выдувания угля была произведена на основании определения значения аэродинамической силы, действующей на единицу площади поверхности груза в характерных областях (рис. 2): от передней торцевой стены до первой стойки кузова (а), от первой стойки до второй (б), от второй стойки до середины кузова (в), от середины кузова до пятой стойки (г), от пятой стойки до шестой (д), от шестой стойки до задней торцевой стены (е).

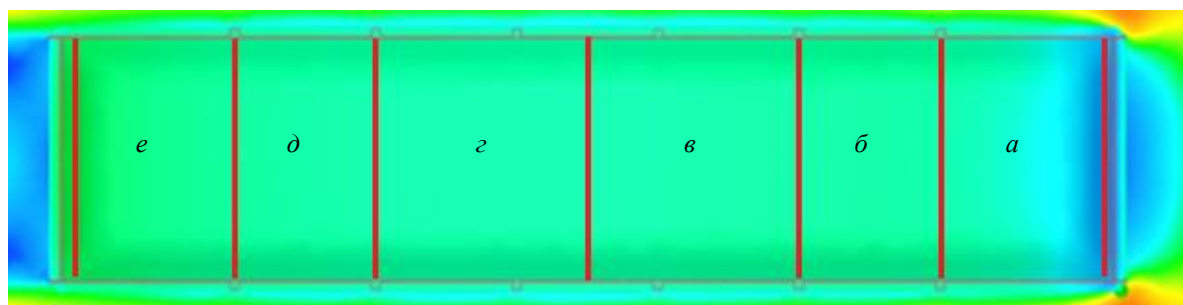


Рис. 2. Характерные области для измерения исследуемых аэродинамических величин (вид сверху, следование вагона слева направо)

Результаты исследования

На созданной виртуальной модели было произведено исследование обтекания полувагона с грузом потоками воздуха при движении поезда с применением специализированного программного обеспечения в области изучения гидрогазодинамики. Общий вид протекания воздушных потоков при различных формах поверхности груза в вагоне при скорости поезда 90 км/ч приведен на рис. 3.

Аэродинамическая сила, действующая на частицы угля на поверхности груза в рассматриваемой области, определяемая в ходе моделирования, численно зависит от величины скорости обтекающих поверхность груза воздушных потоков v_{Δ} , зависящей, в свою очередь, от конфигурации поверхности груза, а также от гранулометрического состава перевозимого угля:

$$F_a = \alpha \rho d^2 \frac{v_{\Delta}^2}{2g}, \quad (4)$$

где α – коэффициент пропорциональности; ρ – действительная плотность частиц угля, кг/м³; d – диаметр частиц угля, мм; g – ускорение свободного падения, м/с² [17].

Задан параметр расчетной модели – шероховатость поверхности груза (6 мм), соответствующая размеру фракции рассматриваемого угля (АШ: 0–6 мм).

Согласно полученным в ходе моделирования данным, наименьшая интенсивность выдувания угля обеспечивается при равномерно распределенной по объему кузова и разровненной поверхности (см. рис. 3, а), область пониженного давления наблюдается в передней части кузова вагона. При наличии областей недогрузов (см. рис. 3, б) разрежение в передней части кузова усиливается. При конусовидной поверхности вне зависимости от количества конусов в углублениях между ними образуются новые области разрежений, способствующие усилению интенсивности выдувания.

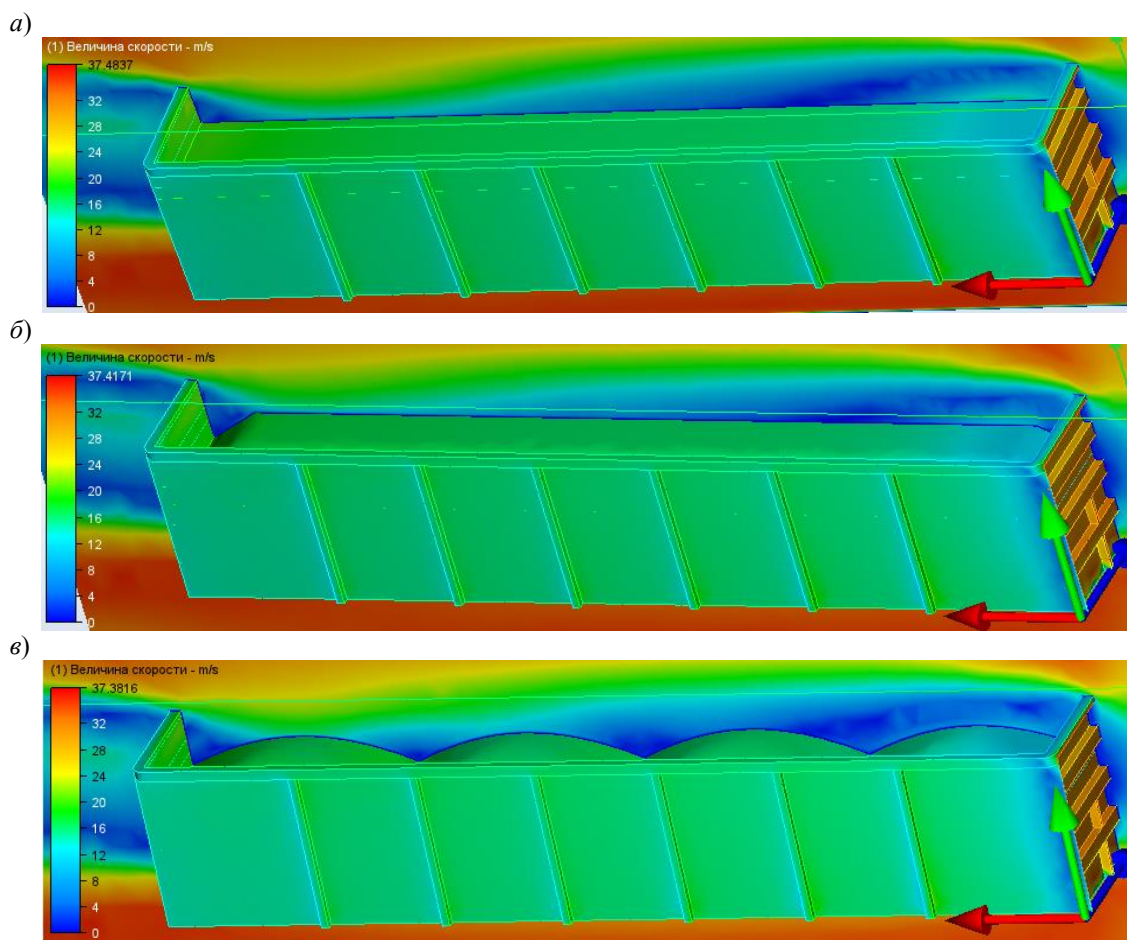


Рис. 3. Общий вид протекания воздушных потоков по поверхности груза в полувагоне (направление следования вагона слева направо):

а – разровненная поверхность; *б* – наличие недогрузов в областях торцевых и боковых стен кузова; *в* – конусовидная

Отрицательные значения аэродинамической силы указывают на ее прижимной характер (ось OY направлена вверх – показана зеленой стрелкой на рис. 3), положительные – на подъемный характер.

Согласно рис. 4, наиболее подверженной выдуванию при погрузке угля ниже уровня стен полувагона, является область в передней части кузова вагона, где наблюдаются при любой конфигурации поверхности груза положительные значения аэродинамической (подъемной) силы. Причем с увеличением количества конусов ее величина растет, что обусловлено дополнительными разрежениями воздуха в углублениях между конусами. В области от первой стойки до второй аэродинамическая сила при разровненной поверхности имеет прижимной характер, однако с увеличением числа конусов ее значение снижается, а при числе конусов четыре и более она приобретает подъемный характер, что связано с усилением разрежения в областях между конусами.

В остальных областях поверхности груза величина рассматриваемой силы изменяется неравномерно ввиду различного попадания вершин конусов и углублений между ними в интересующие нас характерные области. В остальных областях поверхности груза прижимная сила снижается, что говорит о возможности усиления интенсивности выдувания с увеличением числа конусов.

Выводы

Таким образом, можно сделать вывод о том, что форма поверхности груза при его погрузке ниже уровня стен полувагона оказывает значительное влияние на интенсивность выдувания мелких фракций угля и наличие конусов (неразровненной поверхности) приводит к ее увеличению. Если в области первой стойки аэродинамическая (подъемная) сила имеет во всех вариантах рассматриваемых форм поверхности положительные значения (от 994,19 до 1 190,62 Н), то в районе второй стойки с увеличением коли-

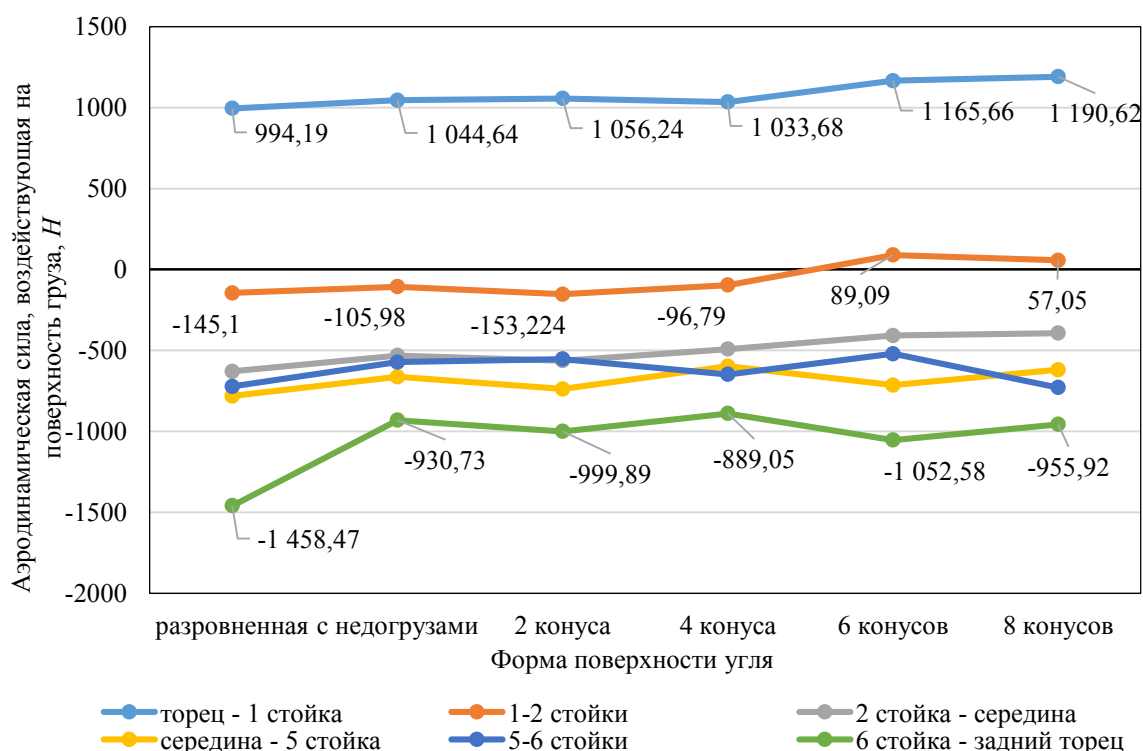


Рис. 4. График величины аэродинамической силы, действующей на поверхность груза в различных частях кузова вагона в зависимости от формы ее поверхности

чества конусов на поверхности груза она переходит из отрицательных значений в положительные (от $-145,1$ до $89,09$ Н) и при количестве конусов шесть и восемь происходит отрыв частиц угля от поверхности, т. е. выдувание груза.

Подводя итог проделанной работы, можно отметить, что на сегодняшний день теоретическая и нормативная базы по предупреждению потерь угля от выдувания не в полной мере учитывают изменившиеся условия перевозки углей: обновление парка полувагонов, пер-

спективное повышение скоростей движения поездов и др., а также не учитывают аэродинамические особенности различных форм поверхностей груза, обусловленные вышерассмотренными физико-механическими свойствами углей и технологией их погрузки.

Выполненные исследования подтвердили важность разработки рекомендаций для технических условий размещения угля в вагоне с учетом особенностей груза, подвижного состава, условий перевозки.

Список источников

1. РЖД в цифрах // ОАО «РЖД» : [сайт]. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9377> (дата обращения: 08.07.2022).
2. Псеровская Е. Д. Снижение потерь навалочных грузов при перевозке // Железнодорожный транспорт. 2020. № 6. С. 64–65.
3. Фришман М. А., Пономаренко Н. А., Финицкий С. И. Конструкция железнодорожного пути и его содержание. М. : Транспорт. 1980. 414 с.
4. Очистка балласта // Железные дороги : [сайт]. URL: <https://lokomotiv.ru/zheleznodorozhnyy-put/ochistka-ballasta.html> (дата обращения: 08.07.2022).
5. Технические условия размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах : утверждены Министерством путей сообщения РФ 27.05.2003 № ЦМ-943. М. : Юртранс, 2003. 544 с.
6. Технические условия погрузки и крепления грузов / Министерство путей сообщения СССР. М. : Транспорт, 1969. 231 с.

7. Технические условия погрузки и крепления грузов : изданы в соответствии с Уставом железных дорог СССР (с изменениями и дополнениями на 01.01.1988) / Министерство путей сообщения СССР. М. : Транспорт, 1988. 408 с.
8. Желдак К. В., Зачешигрова М. А. Проблемы сохранности сыпучих грузов при перевозке // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2021. № 1 (2). С. 33–39.
9. Обеспечение сохранности грузов при железнодорожных перевозках : справочник / В. К. Бешкетов, Ю. А. Носков, А. М. Островский [и др.]. М. : Транспорт, 1982. 238 с.
10. ГОСТ 22235–2010. Вагоны грузовые магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие требования по обеспечению сохранности при производстве погрузочно-разгрузочных и маневровых работ. М. : Стандартинформ, 2011. 22 с.
11. Технические условия размещения и крепления грузов : Приложение 3 к Соглашению о международном железнодорожном грузовом сообщении (СМГС) (с изменениями и дополнениями на 01.07.2019) // Справочно-правовая система «КонсультантПлюс» : [сайт]. URL: www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_133603/ (дата обращения: 16.11.2022).
12. Шувалов Ю. Ю., Шувалова Е. В. Технология погрузки угля в специализированные контейнеры на углепогрузочном комплексе // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2020. № 5. С. 868–876. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_44402039_79573342.pdf (дата обращения: 16.11.2022).
13. Совершенствование перевозок сыпучих грузов для обеспечения экологической безопасности / В. А. Аксенов, О. С. Сачкова, Е. А. Сорокина, В. Б. Шевченко // Транспорт. 2020. № 1. С. 47–53. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_42805075_88709847.pdf (дата обращения: 16.11.2022).
14. Ощепков И. А., Худаносова З. А. Химическая обработка вагонов и угля против примерзания, смерзания и выдувания при перевозках // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности : труды Международной научно-практической конференции (8–11 октября 2013 г., Кемерово). Кемерово, 2013. С. 19–20.
15. ГОСТ 25543–2013. Межгосударственный стандарт. Угли бурые, каменные и антрациты. Классификация по генетическим и технологическим параметрам. М. : Стандартинформ, 2014. 19 с.
16. Жарков В. В., Псел К. Н., Токарев В. Ю. Экспериментальное определение сыпучести сухих строительных смесей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 10. С. 288–297.
17. Глазунов Г. П. Теория ветровой эрозии почв. URL: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01000793229?page=18&rotate=0&theme=white> (дата обращения: 19.04.2022).

References

1. Russian Railways in numbers. (In Russ.). URL: <https://company.rzd.ru/ru/9377>.
2. Pserovskaya E. D. Reduction of bulk cargo losses during transportation. *Railway transport*. 2020;(6):64–65. (In Russ.).
3. Frishman M. A., Ponomarenko N. A., Finitsky S. I. Construction of the railway track and its content. Moscow: Transport; 1980. 414 p. (In Russ.).
4. Cleaning ballast. *Railways: [site]*. (In Russ.). URL: <https://lokomotiv.ru/zhelezнодорожный-пут/ochistka-ballasta.html>.
5. Technical conditions for the placement and fastening of goods in wagons and containers: approved by the Russian Federation Ministry of Railways 27.05.2003 No. CM-943. Moscow: Yurtrans; 2003. 544 p. (In Russ.).
6. Specifications of loading and fastening of goods. USSR Ministry of Railways. Moscow: Transport; 1969. 231 p. (In Russ.).
7. Specifications of loading and fastening of goods: edited in accordance with the Charter of the USSR Railways (with amendments and additions on 01.01.1988). Ministry of Railways. Moscow: Transport; 1988. 408 p. (In Russ.).
8. Zheldak K. V., Zacheshigrova M. A. Problems of bulk goods preservation during transportation. *Fundamental and applied issues of transport*. 2021;(2):33–39. (In Russ.).
9. Beshketo V. K., Noskov Yu. A., Ostrovsky A. M. [et al.]. Ensuring the safety of goods during railway transportation: reference. Moscow: Transport, 1982. 238 p. (In Russ.).
10. GOST 22235–2010. Freight cars of 1520 mm gauge mainline railways. General requirements for ensuring safety during loading and unloading and shunting operations. Moscow: Standartinform; 2011. 22 p. (In Russ.).

11. Technical conditions for the placement and fastening of goods: Appendix 3 to the Agreement on the International Railway Freight Transport (SMGS) with amendments and additions on 01.07.2019). *ConsultantPlus Legal Reference System*. (In Russ.). URL: www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_133603/.
12. Shuvalov Yu. Yu., Shuvalova E. V. Technology of loading coal into specialized containers at the coal loading complex. *Bulletin of the Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping*. 2020;(5):868–876. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_44402039_79573342.pdf.
13. Aksenov V. A., Sachkova O. S., Sorokina E. A., Shevchenko V. B. Improvement of bulk cargo transportation to ensure environmental safety. *Transport*. 2020(1):47–53. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_42805075_88709847.pdf.
14. Oshchepkov I. A., Khudonosova Z. A. Chemical treatment of wagons and coal against freezing, freezing and blowing during transportation. *Energy security of Russia. New approaches to the development of the coal industry. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference (October 8–11, 2013, Kemerovo)*. Kemerovo; 2013. P. 19–20. (In Russ.).
15. GOST 25543–2013. Interstate standard. Coals brown, stone and anthracites. Classification according to genetic and technological parameters. Moscow: Standartinform; 2014. 19 p. (In Russ.).
16. Zharkov V. V., Psel K. N., Tokarev V. Yu. Experimental determination of the flowability of dry building mixtures. *Bulletin of the Tula State University. Technical sciences*. 2013;(10):288–297. (In Russ.).
17. Glazunov G. P. Theory of wind erosion of soils. (In Russ.). URL: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01000793229?page=18&rotate=0&theme=white>.

Информация об авторах

Е. Д. Псеровская – доцент кафедры «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

Р. А. Овчинников – аспирант кафедры «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

E. D. Pserovskaya – Associate Professor of the Freight Operation and Rolling Stock Department, Siberian Transport University, Candidate of Engineering.

R. A. Ovchinnikov – Postgraduate Student of the Freight Operation and Rolling Stock Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 03.10.2022; одобрена после рецензирования 11.11.2022; принята к публикации 23.11.2022.

The article was submitted 03.10.2022; approved after reviewing 11.11.2022; accepted for publication 23.11.2022.

TRANSPORT

Научная статья
УДК 656.212.5
doi 10.52170/1815-9265_2022_63_62

Исследование основного удельного сопротивления движению отцепов при скатывании с сортировочной горки на основе натурных наблюдений

Сергей Анатольевич Бессоненко¹, Антон Андреевич Гунбин²,
Александр Александрович Климов³✉

^{1,2,3} Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

¹ bessonenko@stu.ru

² gunbin_gdsu@mail.ru

³ aklimov@ngs.ru✉

Аннотация. Рассмотрены действующие нормативы для расчета основного удельного сопротивления движению вагонов при скатывании с сортировочной горки, определены причины необходимости их пересмотра и корректировки расчетных значений данного вида сопротивления для практического применения. Изложен порядок проведения натурных наблюдений за процессом скатывания вагонов с сортировочной горки и определения основного удельного сопротивления движению отцепов. Приведены результаты натурных наблюдений, проведенных на сортировочной горке станции И в 2022 г. Выполнена обработка статистических данных по результатам натурных наблюдений, даны рекомендации по дальнейшему использованию полученных значений основного удельного сопротивления движению вагонов при скатывании с сортировочной горки.

Ключевые слова: сортировочная горка, основное удельное сопротивление движению отцепа, натурные наблюдения за процессом скатывания вагонов

Для цитирования: Бессоненко С. А., Гунбин А. А., Климов А. А. Исследование основного удельного сопротивления движению отцепов при скатывании с сортировочной горки на основе натурных наблюдений // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 4 (63). С. 62–68. DOI 10.52170/1815-9265_2022_63_62.

TRANSPORT

Original article

Investigation of the main specific resistance to the movement of cuts when rolling down a gravity hump based on field observations

Sergey A. Bessonenko, Anton A. Gunbin, Aleksandr A. Klimov³✉

^{1,2,3} Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

¹ bessonenko@stu.ru

² gunbin_gdsu@mail.ru

³ aklimov@ngs.ru✉

Abstract. The current standards for calculating the main specific resistance to the movement of cars when rolling down a gravity hump are considered, the reasons for the need to revise them and adjust the calculated values of resistance for practical use are determined. The procedure for carrying out field observations of the rolling car process from a gravity hump and determining the main specific resistance to the movement of cuts is outlined. The results of field observations carried out at the gravity hump of station I in 2022 are presented. The processing of statistical data based on the results of field observations was carried out; recommendations were given for the further use of the main specific resistance obtained values to the rolling of cars from the gravity hump.

Keywords: gravity hump, the main specific resistance to the movement of the cut, field observations of the rolling car process

For citation: Bessonenko S. A., Gunbin A. A., Klimov A. A. Investigation of the main specific resistance to the movement of cuts when rolling down a gravity hump based on field observations. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(63):62–68. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_63_62.

Введение

На современном этапе развития железнодорожного транспорта реализуется принцип концентрации переработки вагонопотоков на меньшем числе технических станций (преимущественно сортировочных) с соответствующим оснащением. Одним из важнейших элементов таких станций являются сортировочные горки, от функционирования которых во многом зависит перерабатывающая способность станции в целом, а также безопасность процесса расформирования-формирования составов.

Определение параметров сортировочных горок производится на основании конструктивных и технологических расчетов, предусматривающих скатывание расчетных бегунов (одиночных вагонов с установленными характеристиками) в установленных условиях [1–5]. При этом важнейшей характеристикой расчетных бегунов является основное удельное сопротивление движению вагона при скатывании с горки, устанавливаемое отдельно для каждой весовой категории вагонов.

Исследования сил сопротивления движению отцепов при скатывании с горки в нашей стране начались в 30-х гг. прошлого века, а в 70–80-х гг. были сформулированы положения расчета сил сопротивления движению отцепов, которые используются и в настоящее время [6–10]. Очевидно, что современные условия эксплуатации сортировочных горок существенно изменились. Это вызывает необходимость корректировки действующих положений расчета.

В части расчета основного удельного сопротивления движению вагонов следует выделить два основных фактора, которые вызывают необходимость пересмотра нормативов:

- произошло существенное обновление вагонного парка, обращающегося на сети железных дорог РФ, в том числе регулярно совершенствуется конструкция вагонов за счет использования в вагоностроении современных материалов и достижений научно-технического прогресса;

- увеличивается парк «инновационных» вагонов, имеющих осевую нагрузку 25 т/ось и более, что приводит к необходимости выполнения отдельных исследований динамики скатывания указанной категории вагонов.

В результате следует ожидать увеличения доли вагонов с «хорошими» и «очень хорошими» ходовыми характеристиками в каждой весовой категории вагонов, соответствующие характеристикам расчетных бегунов «Х» и «ОХ» соответственно, что вызывает необходимость корректировки числовых характеристик основного удельного сопротивления движению вагонов при скатывании с горки. Таким образом, исследование данного вида сопротивления является актуальной задачей на современном этапе развития железнодорожного транспорта.

Целью исследования является определение и анализ силы удельного сопротивления движению отцепов при скатывании с сортировочной горки на основании натурных наблюдений для установления рекомендаций по корректировке существующих положений расчета.

Материалы и методы исследования

В ходе натурных наблюдений за скатыванием отцепов на четной сортировочной горке станции И определялись скорости движения отцепов в контрольных точках, на основании которых в соответствии с существующими методиками расчета производился расчет значений суммарного удельного сопротивления движению отцепов. Для определения значения основного удельного сопротивления w_0 производилось выделение данного значения из величины общего суммарного сопротивления движению отцепа $w_{\text{сум}}$ по формуле

$$w_0 = w_{\text{сум}} - (w_{\text{св}} + w_{\text{ск}} + w_{\text{сн}}),$$

где $w_{\text{св}}$ – сопротивление от среды и ветра; $w_{\text{ск}}$ – сопротивление от стрелочных переводов и кривых; $w_{\text{сн}}$ – сопротивление от снега и инея.

Натурные наблюдения проводились на путях сортировочного парка, поэтому значения $w_{\text{св}}$, $w_{\text{ск}}$, $w_{\text{сн}}$ при решении данной задачи либо не учитывались (в зависимости от периода и условий проведения экспериментов), либо определялись по существующим методикам [10].

Размещение напольного оборудования для измерения фактических значений скорости движения отцепов в сортировочном парке и зоны выполнения измерений скорости скатывающихся отцепов производилось за парковыми тормозными позициями каждого сортировочного пути. Натурные наблюдения проводились в период с июля по ноябрь (включительно) 2022 г.

За начальную точку отсчета принимался изолирующий стык парковой тормозной позиции, скорость движения отцепа в которой определялась по данным радиоизмерителей скорости из архива роспуска (АРМ электроме- ханика горки). В пределах зоны проведения натурных экспериментов скорость движения отцепов определялась с помощью измерителя скорости «ИСКРА-1» завода «Симикон». На основании изменения скорости движения отцепа на участках измерения производился расчет работы сил суммарного удельного сопротивления движению отцепа по существующей методике [10]. При проведении экспериментов для определения направления и скорости ветра, а также температуры наружного воздуха в период скатывания отцепа использовался цифровой термоанемометр DT-618.

Наибольший интерес при выполнении экспериментов представляли отцепы, состоящие из одного вагона. Расчет сил сопротивления, в том числе основного сопротивления, для таких отцепов будет наиболее точным по сравнению с расчетом для отцепов, состоявших из нескольких вагонов, в котором удельные значения сопротивления определяются как усредненные значения для каждого вагона в отцепе, которые в свою очередь имеют свои уникальные характеристики.

Результаты исследования

В табл. 1 приведен фрагмент результатов натурных наблюдений за процессом скатывания отцепов с горки. Расчет сил сопротивления $w_{св}$ и w_0 выполнялся для средних значений уклона пути сортировочного парка $i_{ср}$ на рассматриваемом отрезке скатывания.

После обработки статистических данных по результатам натурных наблюдений были построены функции плотности распределения

случайной величины w_0 для всех весовых категорий вагонов. Наибольший интерес представляют плотности распределения основного удельного сопротивления движению отцепов для легкой и тяжелой весовых категорий вагонов, числовые характеристики которых приведены в табл. 2 и 3. Функции плотностей распределения величины w_0 для легкой и тяжелой весовых категорий вагонов приведены на рис. 1 и 2 соответственно.

В существующих методиках расчета принимается минимальное значение величины $w_0 = 0,5$ Н/кН. Полученные данные показывают, что в настоящее время на сортировочных горках перерабатываются вагоны, которые могут иметь меньшие значения основного удельного сопротивления движению, выходящие за пределы установленной области допустимых значений. Данный факт подтверждает предположение об улучшении ходовых свойств вагонного парка в целом, в том числе за счет увеличения доли «инновационных» вагонов.

В результате можно сделать вывод о наличии тенденции к увеличению фактической скорости движения вагонов на спускной части горки и в сортировочном парке. Данный факт необходимо учитывать в оперативных условиях управления роспуском. Так как на большинстве сортировочных горок используется режим интервально-прицельного регулирования скорости скатывания отцепов, увеличение скоростного режима движения вагонов необходимо учитывать отдельно для спускной части и сортировочного парка.

Для автоматизированных сортировочных горок указанные изменения скоростного режима учитываются после расчета фазовых траекторий скатывания отцепов в системе КСАУ СП за счет корректировки скоростей движения

Таблица 1

Результаты натурных наблюдений за скатыванием отцепов с четной сортировочной горки станции И

Номер пути	Тип вагона	Весовая категория вагонов	Масса вагона, т	Длина участка, м	$i_{ср}$, ‰	$w_{св}$, Н/кН	w_0 , Н/кН	$w_{сум}$, Н/кН
19	Крытый	Тяжелая	93,0	56,13	0,56	0,004	1,087	1,091
21	Полувагон	Тяжелая	92,0	51,03	0,90	0,001	0,414	0,415
19	Цистерна	Тяжелая	92,6	56,13	0,56	0,002	0,221	0,223
19	Крытый	Тяжелая	91,0	56,13	0,56	0,003	0,543	0,546
19	Крытый	Среднетяжелая	62,0	51,13	0,57	0,004	0,982	0,986
...

Таблица 2

**Распределение вероятностей основного удельного сопротивления движению отцепов
при скатывании с горки станции И**

Разряд	Вероятность попадания в разряд	Значение интегральной функции
<i>Легкая весовая категория</i>		
0,00–0,23	0,06	0,06
0,23–1,00	0,06	0,12
1,00–1,76	0,50	0,62
1,76–2,53	0,28	0,90
2,53–3,30	0,10	1,00
<i>Тяжелая весовая категория</i>		
0,38–0,57	0,10	0,10
0,57–0,76	0,10	0,20
0,76–0,95	0,18	0,38
0,95–1,14	0,18	0,56
1,14–1,33	0,20	0,76
1,33–1,52	0,08	0,84
1,52–1,71	0,05	0,89
1,71–1,90	0,05	0,94
1,90–2,09	0,00	0,94
2,09–2,28	0,03	0,97
2,28–2,47	0,00	0,97
2,47–2,66	0,02	0,99
2,66–2,85	0,01	1,00

Таблица 3

**Параметры распределения основного удельного сопротивления движению отцепа
при скатывании с горки станции И**

Параметр	Весовая категория вагонов	
	легкая	тяжелая
Математическое ожидание, Н/кН	1,703	1,148
Стандартная ошибка, Н/кН	0,182	0,083
Медиана, Н/кН	1,354	1,085
Среднеквадратическое отклонение, Н/кН	0,772	0,528
Дисперсия	0,597	0,279
Асимметричность	0,330	1,231

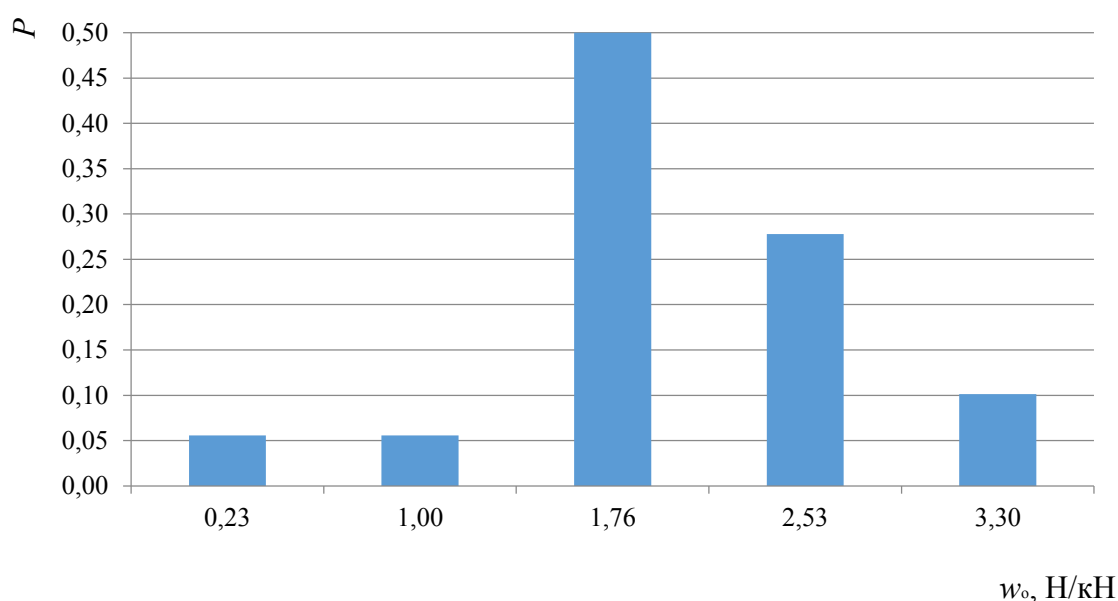


Рис. 1. Плотность распределения вероятностей основного удельного сопротивления движению вагонов легкой весовой категории

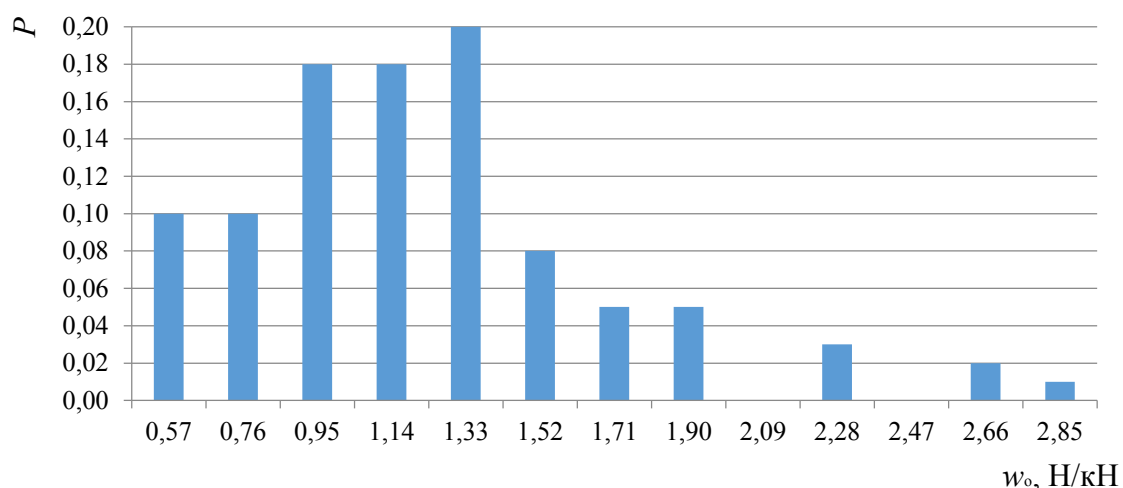


Рис. 2. Плотность распределения вероятностей основного удельного сопротивления движению вагонов тяжелой весовой категории

вагонов на маршруте при использовании адаптивных систем управления. Однако указанная корректировка производится при следовании отцепа в пределах спускной части горки, а также в подсистеме контроля заполнения путей (КЗП), определяющей скорость выхода отцепа с парковой тормозной позиции. При дальнейшем скатывании отцепа в сортировочном парке могут возникать случаи его ускоренного движения, что увеличивает вероятность превышения допустимых скоростей соединения вагонов и возникновения случаев повреждения вагонов и находящихся в них грузов.

Для механизированных горок тенденция увеличения скоростей скатывания отцепов приводит к необходимости повышенного контроля со стороны персонала сортировочных горок за скатыванием отцепов из одиночных вагонов с «хорошими» ходовыми свойствами (особенно тяжелой весовой категории и «инновационных» вагонов). Выпуск указанных отцепов в парк рекомендуется с уменьшением

скорости выхода с парковой тормозной позиции. Это, с одной стороны, приведет к снижению вероятности соударения вагонов с повышенными скоростями, а с другой – будет способствовать увеличению пространственных промежутков (окон) между группами вагонов в парке и, как следствие, снижению перерабатывающей способности горки за счет увеличения среднего числа осаживаний, приходящихся на один накапливаемый состав.

Сравнение числовых характеристик распределений, полученных по результатам натурных наблюдений, со значениями, используемыми в существующих методиках расчета, приведено в табл. 4.

Полученные результаты показывают некоторые отклонения от используемых в настоящее время числовых характеристик. Для выработки рекомендаций по корректировке расчетных значений основного удельного сопротивления движению вагонов при скатывании с горки также целесообразно:

Таблица 4

Сравнение числовых характеристик плотностей распределения основного удельного сопротивления движению отцепов при скатывании с сортировочной горки

Весовая категория вагонов	Масса вагона, т	Среднее значение w_0 , Н/кН	Среднее квадратическое отклонение σ_{w_0} , Н/кН
<i>Существующая методика</i>			
Легкая	До 28	1,75	0,67
Тяжелая	Свыше 72	1,23	0,35
<i>Результаты натурных наблюдений для станции И</i>			
Легкая	До 28	1,70	0,77
Тяжелая	Свыше 72	1,15	0,53

1) провести дополнительные натурные испытания на других сортировочных горках сети железных дорог (в том числе расположенных в разных климатических зонах);

2) увеличить общее число экспериментов (в том числе с учетом проведения натурных наблюдений за скатыванием отцепов на сортировочных горках, расположенных в различных климатических зонах) для получения более точных результатов;

3) выполнить сопоставление полученных результатов при проведении натурных наблюдений с данными о результатах скатывания этих же отцепов, полученных из информационных баз данных;

4) получить итоговые плотности распределения основного удельного сопротивления движению по результатам обработки данных натурных наблюдений и статистической информации о результатах скатывания этих же отцепов в информационных базах данных.

Выводы

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Выполненные натурные наблюдения за скатыванием отцепов с сортировочной горки подтвердили предположение об улучшении ходовых характеристик вагонного парка, эксплуатируемого на сети железных дорог РФ в настоящее время. В перерабатываемом на сортировочной горке станции И вагонопотоке значение основного удельного сопротивления движению для части вагонов было меньше минимально установленного в существующих методиках расчета (менее 0,5 Н/кН). Следовательно, вагоны со значением основного удельного сопротивления $w_0 < 0,5$ Н/кН на отдельных участках спускной части горки будут быстрее набирать скорость, а при движении в

сортировочном парке и использовании режима прицельного торможения движение таких вагонов может оказаться ускоренным.

2. Полученные результаты указывают на необходимость учета возможных изменений скоростного режима скатывания отдельных вагонов в оперативных условиях эксплуатации как на автоматизированных, так и на механизированных сортировочных горках. В частности, необходим повышенный контроль за скатыванием отцепов из одиночных вагонов с «хорошими» ходовыми свойствами (преимущественно тяжелой весовой категории и «инновационных» вагонов), особенно при скатывании на путях сортировочных парков после выхода с парковой тормозной позиции.

3. Полученные плотности распределения основного удельного сопротивления движению по результатам натурных наблюдений за скатыванием отцепов с сортировочной горки станции И имеют отличия от числовых характеристик, используемых в существующих методиках. В частности, расчетные значения основного удельного сопротивления движению вагона для легкой и тяжелой весовых категорий составляют соответственно: по существующей методике – 1,75 и 1,23 Н/кН; по результатам натурных наблюдений – 1,70 и 1,15 Н/кН.

4. Для выработки итоговых рекомендаций по корректировке числовых характеристик указанного вида сопротивления необходимо увеличить число проводимых экспериментов (в том числе на сортировочных горках, расположенных в других климатических зонах), а также произвести сопоставление и анализ результатов скатывания отцепов с архивными данными о результатах скатывания этих же отцепов из информационных систем. Эти задачи планируется решить на следующих этапах исследования.

Список источников

1. Бессоненко С. А. Теория расчета сортировочных горок для различных климатических зон : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.22.08 / Бессоненко Сергей Анатольевич. Москва, 2010. 419 с.
2. Гунбин А. А. Исследование интервалов на разделительных элементах сортировочной горки при скатывании отцепов дифференцированной длины // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2017. № 3 (35). С. 108–117.
3. Осипов Д. В. Метод расчета координат точек отрыва одновагонных отцепов на перевальной части сортировочных горок // Транспорт: наука, техника, управление. 2016. № 3. С. 62–66.
4. Осипов Д. В., Климов А. А. Особенности расчета удельных сил сопротивления движению отцепа при имитационном моделировании процесса расформирования составов // Современные проблемы и пути

их решения в науке, транспорте, производстве и образовании : материалы международной научно-практической конференции. Одесса, 2010. С. 69–75.

5. Корниенко К. И. Построение кривой распределения основного удельного сопротивления движению вагонов в сортировочном парке с учетом перерабатываемого вагонопотока и отцепопотока // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2019. № 1 (48). С. 20–28.

6. Фролов А. Н., Ботсманов Б. В. Сопротивление вагонов при скатывании с горок // Труды ВНИИЖТа. Москва, 1939. Вып. 60. 133 с.

7. Страковский И. И. Сопротивление вагонов при скатывании с горок в зимнее время // Труды ВНИИЖТа. Москва, 1952. Вып. 63. 132 с.

8. Орлов А. П., Волков В. П. Новые нормы удельных сопротивлений для расчета сортировочных горок // Железнодорожный транспорт. 1964. № 6. С. 50–52.

9. Сопротивление движению грузовых вагонов при скатывании с горок / под ред. Е. А. Сотникова // Труды ВНИИЖТа. Москва : Транспорт, 1975. Вып. 545. 102 с.

10. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах колеи 1520 мм : утверждены Министерством путей сообщения РФ 10.10.2003. Москва : Техинформ, 2003. 168 с.

References

1. Bessonenko S. A. Theory of calculation of sorting slides for various climatic zones: dissertation for the degree of Doctor of Engineering: 05.22.08 / Sergey A. Bessonenko. Moscow; 2010. 419 p. (In Russ.).

2. Gunbin A. A. Investigation of intervals on the dividing elements of the sorting slide when rolling off the hooks of differentiated length. *Bulletin of the Ural State University of Railway Transport*. 2017;(35):108–117. (In Russ.).

3. Osipov D. V. Method for calculating the coordinates of the points of separation of single-car cuts on the saddle part of marshalling humps. *Transport: science, technology, management*. 2016;(3):62–66. (In Russ.).

4. Osipov D. V., Klimov A. A. Features of calculating the specific forces of resistance to the movement of the cut in the simulation of the process of disbanding train. *Modern problems and ways of their solution in science, transport, production and education: materials of the International scientific-practical conference*. Odessa; 2010. P. 69–75. (In Russ.).

5. Kornienko K. I. Construction of the distribution curve of the main specific resistance to the movement of cars in the marshalling yard, taking into account the processed car traffic and uncoupling traffic. *Bulletin of the Siberian Transport University*. 2019;(48):20–28. (In Russ.).

6. Frolov A. N., Botsmanov B. V. The resistance of wagons when rolling down hills. *Proceedings of VNIIZhT*. Moscow; 1939. Issue 60. 130 p. (In Russ.).

7. Strakovsky I. I. Resistance of wagons when rolling down hills in winter. *Proceedings of VNIIZhT*. Moscow; 1952. Issue 63. 129 p. (In Russ.).

8. Orlov A. P., Volkov V. P. New norms of resistivity for the calculation of marshalling humps. *Railway transport*. 1964;(6):50–52. (In Russ.).

9. Sotnikov E. A. Resistance to the movement of freight cars when rolling down hills. *Proceedings of VNIIZhT*. Moscow: Transport; 1975. Issue 545. 104 p. (In Russ.).

10. Rules and norms for the design of marshalling devices on 1520 mm gauge railways: approved by the Russian Federation Ministry of Railways 10.10.03. Moscow: Tekhinform; 2003. 168 p. (In Russ.).

Информация об авторах

С. А. Бессоненко – профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой» Сибирского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук.

А. А. Гунбин – доцент кафедры «Железнодорожные станции и узлы» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

А. А. Климов – доцент кафедры «Железнодорожные станции и узлы» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

Information about the authors

S. A. Bessonenko – Professor of the Field Operation Management Department, Siberian Transport University, Doctor of Engineering.

A. A. Gunbin – Associate Professor of the Railway Stations and Junctions Department, Siberian Transport University, Candidate of Engineering.

A. A. Klimov – Associate Professor of the Railway Stations and Junctions Department, Siberian Transport University, Candidate of Engineering.

Статья поступила в редакцию 28.11.2022; одобрена после рецензирования 03.12.2022; принята к публикации 07.12.2022.

The article was submitted 28.11.2022; approved after reviewing 03.12.2022; accepted for publication 07.12.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 4 (63). С. 69–76.
The Siberian Transport University Bulletin. 2022. No. 4 (63). P. 69–76.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 656.2

doi 10.52170/1815-9265_2022_63_69

Климатическая камера для проведения испытаний на стойкость к переменному давлению при заданных температурных режимах

Виктор Анатольевич Макаров

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия, mv1254143@gmail.com

Аннотация. В статье описана климатическая камера для проведения испытаний строительных конструкций на стойкость к переменному давлению при заданных температурных режимах окон и дверей вагонов поездов и транспортных объектов (в том числе для определения ресурса работоспособности), которая может быть использована в различных отраслях промышленности, преимущественно в транспортном машиностроении и в строительной индустрии при испытаниях окон и дверей для жилых, общественных, производственных и вспомогательных зданий и помещений.

В отличие от известных аналогов данная климатическая камера позволяет проводить испытания на стойкость к переменному давлению при заданных температурных режимах как внутри, так и снаружи помещений в условиях, практически приближенных к реальным, что дает возможность существенно повысить надежность и долговечность ограждающих конструкций.

Ключевые слова: надежность, переменное давление, определение прочности, климатическая камера, климатические испытания

Для цитирования: Макаров В. А. Климатическая камера для проведения испытаний на стойкость к переменному давлению при заданных температурных режимах // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 4 (63). С. 69–76. DOI 10.52170/1815-9265_2022_63_69.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Climatic chamber for testing resistance to variable pressure at specified temperature conditions

Victor A. Makarov

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia, mv1254143@gmail.com

Abstract. The article describes a climatic chamber for testing building structures for resistance to variable pressure at given temperature conditions of windows and doors, including for determining the service life, and can be used in various industries, mainly in transport engineering and in the construction industry during testing windows and doors for residential, public, industrial and auxiliary buildings and premises.

In contrast to known analogues, a climatic chamber is described for testing resistance to variable pressure at specified temperature conditions for testing windows of train cars and transport facilities, which allows testing for resistance to variable pressure at specified temperature conditions both inside and outside the premises.

Keywords : reliability, variable pressure, determination of strength, climatic chamber, climatic tests

For citation : Makarov V. A. Climatic chamber for testing resistance to variable pressure at specified temperature conditions. The Siberian Transport University Bulletin. 2022;(63):69–76. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_63_69.

Введение

Актуальность разработки климатической камеры для проведения испытаний на стойкость к переменному давлению при заданных температурных режимах [1] обосновывается тем, что основным свойством современных окон, устанавливаемых в вагонах поездов и в строительных конструкциях, расположенных вблизи транспортных объектов, является стойкость к переменному давлению, которое возникает в момент прохождения транспорта вблизи строительных конструкций, прохождения тоннеля или расхождения транспортных потоков встречных направлений [2–4].

В условиях возрастания скорости движения транспорта повышение стойкости к переменному давлению при заданных температурных режимах является очень важным испытанием, так как при увеличении скорости движения увеличивается и величина переменного давления, воздействующего на окна строительных конструкций и объектов транспорта, что может привести к разрушению окон, а также травмированию пассажиров и обслуживающего персонала [5, 6].

В конструкциях окон современных вагонов поездов и транспортных объектов [7–11] используются различные материалы, прочностные характеристики которых изменяются в зависимости от температуры [12–15]. Поэтому необходимо производить испытания на стойкость переменному давлению в различных температурных режимах. К примеру, резиновые уплотнения окон вагонов поездов и транспортных объектов могут пройти испытания на стойкость к переменному давлению при нормальных климатических условиях (термин «нормальные климатические условия» подробно описан в ГОСТ 16504–81 «Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения»). Однако при понижении температуры происходит уменьшение подвижности полимерных цепей, что приводит к уменьшению эластичности резиновых изделий, входящих в состав оконного блока. Другими словами, при многократно повторяющихся циклах воздействия переменного давления на испытываемые оконные блоки вагонов поездов и транспортных объектов в условиях пониженных температур наблюда-

ется появление трещин в резиновых изделиях, входящих в состав оконных блоков; резиновые уплотнения разрушаются и перестают выполнять свою функцию, что впоследствии может привести к полному разрушению остекления оконного блока и травмированию пассажиров и обслуживающего персонала [16].

При повышении температуры также происходит ухудшение прочностных характеристик резиновых уплотнений, входящих в состав оконного блока. Резиновые изделия становятся более пластичными, что может привести к выпадению остекления оконного блока и травмированию пассажиров. Так как использование оконных блоков на железнодорожном транспорте и транспортных объектах предполагает эксплуатацию в температурных режимах от -50 до $+50$ °C, то и испытание этих изделий на воздействие переменного давления необходимо проводить при данных температурных значениях, при этом следует имитировать температурные режимы как снаружи, так и внутри вагона.

Известные методы климатических испытаний боковых окон железнодорожного подвижного состава включают в себя испытания на воздействие:

- верхнего значения температуры среды при эксплуатации;
- нижнего значения температуры среды при эксплуатации;
- влажности воздуха.

Существующий способ проведения климатических испытаний не имитирует работу окон вагонов поездов и транспортных объектов в реальных условиях по следующим причинам:

1. Во время проведения испытаний на окна воздействуют только климатические факторы, а в реальных условиях, помимо температуры и влажности, добавляется переменное давление. Если проводить испытания на динамическое давление при нормальных климатических условиях, то испытываемое окно и резиновые уплотнения в его составе могут пройти испытания, а в реальных условиях при одновременном воздействии температуры и динамического давления резиновые уплотнения, использующиеся в окнах, могут менять свои характеристики, а именно «дубеть» при низких температурах и быть более пластичными

при высоких. Если при этом на окно не воздействуют механически, имитируя переменное давление, характерное для прохождения тоннелей или расхождения поездов, то оно может считаться прошедшим испытания. Но в реальных условиях окна поезда могут разрушиться в связи с деформацией резиновых уплотнений в составе окна. Так же может случиться и при высоких температурах. При воздействии высоких температур резиновые уплотнения становятся более пластичными, что при воздействии переменного давления может привести к выдавливанию остекления и последующему разрушению окон.

2. Во время прохождения климатических испытаний на окно действует одинаковая температура, что не характерно для реальных условий, при которых температура различается внутри и снаружи помещений. Согласно СП 2.5.1198-03, температура воздуха в помещениях в зимнее время должна поддерживаться на уровне $(22 \pm 2)^\circ\text{C}$, а в летнее время (для помещений с установками для кондиционирования воздуха) при внешней температуре $24-40^\circ\text{C}$ – $22-26^\circ\text{C}$.

В связи с тем что на окно действуют разные температурные режимы внутри и снаружи помещений, также возможны деформации и разрушения составляющих частей окна.

Недостатком известного метода испытаний является невозможность проводить климатические испытания при воздействии переменного давления, а также имитировать различные температурные режимы внутри и снаружи помещений, что не позволяет оценить работу окон и дверей при работе в реальных условиях. В связи с этим данный метод испытаний не подходит для проведения испытаний окон [17]. Для имитации реальных процессов необходимо во время проведения климатических испытаний не только оказывать переменное давление на окна, имитируя прохождение транспортом тоннеля или расхождение транспортных потоков встречных направлений, но и выдерживать заданные температурные режимы, характерные для помещений и окружающей среды. Существующие климатические камеры не имеют такой возможности.

Описанная в данной статье климатическая камера для проведения испытаний окон ваго-

нов поездов и транспортных объектов на стойкость к переменному давлению при заданных температурных режимах [1] позволяет проводить испытания при воздействии переменного динамического давления в заданных температурных режимах, характерных для использования окон, установленных в движущихся объектах (например, в зданиях, расположенных вблизи транспортных объектов или в высокоскоростном наземном транспортном средстве). Использование описанной в статье климатической камеры позволит расширить состав существующих испытаний, а следовательно, изготавливать окна, стойкие к переменным аэродинамическим нагрузкам в заданных температурных режимах, что в конечном счете положительно отразится на повышении безопасности.

Материалы и методы исследования

Климатическая камера для проведения испытаний на стойкость к переменному давлению при заданных температурных режимах [1] позволяет производить испытания при воздействии переменного аэродинамического давления в заданных температурных режимах, характерных для использования окон и дверей жилых, общественных, производственных и вспомогательных зданий и помещений.

Климатическая камера (рис. 1) содержит основание 1, на котором установлены операторский 2, среднетемпературный 3 и низкотемпературный 4 отсеки, оборудованные установками для создания климатических режимов и аппаратурой для регистрации температурно-влажностных параметров; в низкотемпературном отсеке камеры установлена рама 5 с возможностью возвратно-поступательного движения относительно каркаса для крепления испытуемого изделия 6, установленного между средне- и низкотемпературным отсеками посредством гидропривода 7; дополнительно содержит установленный на основании электродвигатель с регулятором напряжения 8, связанный посредством гидропривода 7 с рамой 5, на которой установлен датчик импульсов, электрически связанный со счетчиком циклов 9 в операторском отсеке 2.

Для получения достоверных результатов испытаний необходимо установить испытуемое окно в каркас, полностью имитирующий

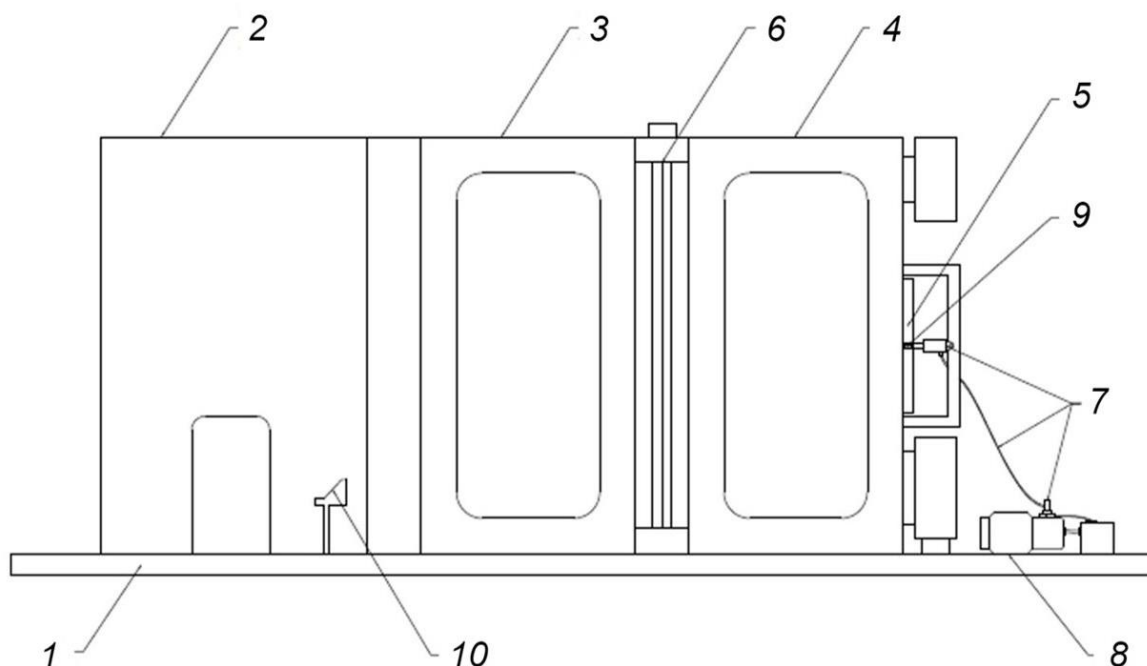


Рис. 1. Климатическая камера:

1 – основание; 2 – операторский отсек; 3 – среднетемпературный отсек;
4 – низкотемпературный/высокотемпературный отсек; 5 – рама с возможностью
возвратно-поступательного движения; 6 – каркас для крепления испытуемого изделия;
7 – гидропривод; 8 – электродвигатель с регулятором напряжения; 9 – счетчик циклов;
10 – пульт управления

крепление в реальных условиях. Если необходимо произвести испытания не одного окна, а вместе с частью ограждающей конструкции, то следует изготовить каркас, не только имитирующий крепление окна в проеме вагона, но и часть ограждающей конструкции с термоизоляцией.

Испытуемое окно в каркасе устанавливается не только с аналогичными используемым в реальности крепежными элементами, но и с теплоизолирующими материалами с такими же свойствами (рис. 2), как и у используемых в строительных конструкциях, на которые планируется установка испытуемых окон.

В качестве основания 1 может быть использован пол производственного помещения либо отдельная конструкция, например плита или рама, как показано на рис. 1.

Камера состоит из операторского отсека 2, среднетемпературного отсека 3, низкотемпературного отсека 4. Необходимая температура в низкотемпературном отсеке 4 поддержива-

ется за счет низкотемпературной компрессорной установки. Также в низкотемпературном отсеке 4 расположен воздухоохладитель низкотемпературной установки, клапан для выравнивания давления и дверь. В среднетемпературном отсеке 3 размещается аппаратура для съема и передачи данных, оборудование для создания и поддержания климатических условий при проведении испытаний. С целью исключения влияния оператора на процесс испытаний операторский отсек 2 оснащен пультом управления 10 и аппаратурой для контроля за ходом проведения лабораторных испытаний.

Поддержание и фиксирование необходимой температуры внутри отсеков камеры происходит с помощью установок для создания климатических режимов и аппаратуры для регистрации температурно-влажностных параметров. Таким образом, можно проводить теплотехнические испытания, как в стандартных камерах.



Рис. 2. Испытуемое окно в каркасе с теплоизолирующим материалом

При необходимости проведения теплотехнических испытаний под воздействием переменного динамического давления необходимо также вставить испытуемое изделие в каркас 6, который устанавливается в проем между среднетемпературным 4 и низкотемпературным 3 отсеками так, чтобы имитировалась установка изделия в штатную конструкцию. Подвижная рама 5 низкотемпературного отсека 4 климатической камеры приводится в движение с помощью гидропривода 7. Шток гидроцилиндра через шланги соединен с гидрораспределителем и гидронасосом гидропривода. Гидронасос соединен с электродвигателем 8, баком, предохранительным и обратным клапанами. Электродвигатель 8 электрически соединен с пультом управления, установленным внутри операторского отсека.

При проведении теплотехнических испытаний под воздействием переменного динамического давления климатическая камера [1] работает следующим образом. При помощи пульта управления, расположенного внутри

операторского отсека 2 климатической камеры, включается в электродвигатель 8. Он приводит в движение гидронасос системы гидропривода 7, который при помощи жидкости из бака через шланги и распределитель приводит в возвратно-поступательное движение шток поршня гидроцилиндра. Для безопасной работы в гидроприводе 7 имеются предохранительный и обратный клапаны. Шток гидроцилиндра соединен с подвижной рамой 5 низкотемпературного отсека 4 климатической камеры. При возвратно-поступательном движении штока приводится в движение подвижная рама 5 низкотемпературного отсека 4 климатической камеры, при этом создается переменное давление внутри низкотемпературного отсека 4 климатической камеры, что имитирует разрежение либо избыточное давление, создаваемое при прохождении поездами тоннелей или расхождении поездов встречных направлений.

Величина создаваемого давления и разрежения внутри камеры зависит от смещения

рамы 5 низкотемпературного отсека 4, таким образом можно имитировать различные скоростные режимы поездов, поскольку величина переменного динамического давления зависит от скорости движения поездов. Также допускается изменение скорости возвратно-поступательного движения рамы 5 с помощью регулятора напряжения электродвигателя 8 и гидропривода 7. Количество циклов перемещений рамы 5 фиксируется датчиком импульсов 9 и отображается на счетчике циклов.

Таким образом, можно отслеживать изменения испытываемых изделий в зависимости от температуры и количества циклов нагрузки, а следовательно и проводить теплотехнические испытания окон и дверей при воздействии переменного динамического давления в различных температурных режимах, характерных для окон и дверей движущихся объектов, например высокоскоростного наземного транспорта, движущегося в различных температурных режимах.

Тем самым был достигнут технический результат и расширен функционал возможностей климатической камеры за счет проведения теплотехнических испытаний в различных температурных режимах при воздействии переменного давления на испытываемое изделие.

Результаты исследования

С помощью описанной климатической камеры были проведены испытания комплекта окон вагонов поездов и транспортных объектов на стойкость к переменному давлению при заданных температурных режимах. Воздействие переменного давления на испытываемые окна производилось при имитации климатической камерой воздействия:

- верхнего значения температуры среды при эксплуатации;
- нижнего значения температуры среды при эксплуатации;
- влажности воздуха при эксплуатации.

В ходе проведения перечисленных испытаний были выявлены следующие недостатки существующих конструктивных решений испытываемых окон:

- недостаточные теплоизолирующие свойства ввиду полного промерзания стеклопакета. Температура на поверхности испытываемого окна внутри среднетемпературного отсека камеры опустилась ниже допустимых пределов, что

свидетельствует о низких теплоизоляционных свойствах испытываемого изделия;

- полное разрушение стеклопакета с выпадением его из конструкции испытываемого окна, что свидетельствует о низкой прочности стеклопакета, используемого в конструкции испытываемого изделия;

- «дубение» резиновых уплотнений при воздействии низких температур и переменного давления с образованием трещин в местах склеивания;

- нарушение герметичности стеклопакета с образованием влаги внутри стеклопакета при проведении испытания на воздействие влажности воздуха;

- разрушение клея-герметика в местах соединений, которое информирует о необходимости замены используемых в конструкции клеевых составов;

- разрушение механизма закрытия форточки и деформация резиновых уплотнений, указывающие на недостаточную прочность механизмов и невозможность использования данного механизма в окнах вагонов поездов и транспортных объектов.

После выявления недостатков, свойственных существующим конструктивным решениям испытываемых окон вагонов поездов и транспортных объектов, были произведены замены поставщиков стеклопакетов и резиновых уплотнений, стали использоваться другие составы для склеивания и герметизации, а также были внесены изменения в конструкцию окон.

Выводы

В данной статье рассмотрена климатическая камера для проведения испытаний окон вагонов поездов и транспортных объектов на стойкость к переменному давлению при заданных температурных режимах [1]. В отличие от существующих климатических камер и методов испытаний на них, описанная в данной статье климатическая камера дополнительно предусматривает возможность проведения климатических испытаний при воздействии переменного аэродинамического давления при заданных температурных режимах и дает возможность отслеживать изменения испытываемых изделий в зависимости от температуры и количества циклов нагрузки, а следовательно и проводить теплотехнические ис-

питания окон и дверей при воздействии переменного аэродинамического давления в различных температурных режимах, характерных для использования окон и дверей вблизи движущихся объектов и на транспорте, движущемся в различных температурных режимах, вследствие чего повысится безопасность нахождения людей в зданиях и высокоскоростном наземном транспорте.

После проведения испытаний и выявления недостатков существующих конструктивных решений испытуемых окон вагонов поездов и транспортных объектов были произведены замены поставщиков стеклопакетов и резиновых уплотнений, стали использоваться другие составы для склеивания и герметизации, были внесены изменения в конструкцию окон.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Патент на полезную модель № 182624 Российская Федерация, МПК G01N 25/58 (2006.01). Стенд для испытаний на надежность окон и дверей : № 2018117084 : заявл. 07.05.2018 : опубл. 24.08.2018 / Макаров В. А., Бороненко Ю. П. ; заявитель ПГУПС. 7 с.
2. Лопушинский В. И. Сопротивление паровозов и вагонов в движении и действии паровой машины паровоза на основании динамометрических и индикаторных опытов, проведенных в 1877–1879 гг. на Моршанско-Сызранской железной дороге. Санкт-Петербург : Типография Министерства путей сообщения (А. Бенке), 1883. 152 с.
3. Астахов П. Н. Сопротивление движению железнодорожного подвижного состава // Труды ЦНИИ МПС. Москва : Транспорт, 1966. Вып. 311. 178 с.
4. Волков К. Н., Емельянов В. Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. Москва : Физматлит, 2008. 368 с.
5. Аэродинамика тел при движении в тоннелях (стволах шахт) : отчет о НИР / Петербургский государственный университет путей сообщения ; руководитель И. И. Челноков. № ГР 75046741. СПб., 2005. 98 с.
6. Романенко Г. А., Сюзюмова Е. И. Исследования аэродинамического сопротивления скоростных поездов // Некоторые вопросы экспериментальной аэродинамики. 1973. Вып. 24. С. 110–118.
7. Лазаренко Ю. М., Капустин А. Н. Аэродинамическое воздействие высокоскоростного электропоезда «Сапсан» на пассажиров на платформах и на встречные поезда при скрещении // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2012. № 4. С. 11–14.
8. Чурков Н. А. Аэродинамика железнодорожного поезда. Москва : Желдориздат, 2007. 332 с.
9. Soper D. The aerodynamics of a container freight train // University of Birmingham Research Archive. 2014. 371 p.
10. Mohammad A. R., Mohebbi M. Numerical calculations of aerodynamic performance for ATM train at crosswind conditions // Wind and Structures. 2014. Vol. 18. P. 529–548.
11. Сидоров О. А., Смердин А. Н., Чепурко А. Е. Применение CFD-метода для определения аэродинамических сил токоприемника и его аэродинамического устройства // Электрификация транспорта. 2013. № 6. С. 113–119.
12. Flow structures in the near wake of the Ahmed model / G. Vio, S. Watkins, P. Mousley, J. Watmuff, S. Prasad // Journal of Fluids and Structures. 2005. Vol. 20. P. 673–695.
13. Schulte-Werning B., Heine C., Matschke G. Unsteady wake characteristics of high speed trains // PAMM Proceedings Applied Maths and Mechanics. 2003. Vol. 2. P. 332–333.
14. Сюзюмова Е. М., Романенко Г. А. Оценка количественных и качественных характеристик воздушного сопротивления скоростного поезда // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 1978. № 4. С. 31–34.
15. Spalart P. R. Strategies for turbulence modeling and simulations // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2000. Vol. 21. P. 252–263.
16. The slipstream and wake of a high speed train / C. J. Baker, S. J. Dalley, T. Johnson, A. Quinn, N. G. Wright // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F Journal of Rail and Rapid Transit. 2001. P. 83–99.
17. Piomelli U., Balaras E. Wall-layer models for large-eddy simulations // Annual review of fluid mechanics. 2002. Vol. 34. P. 349–374.

References

1. Makarov V. A., Boronenko Yu. P.; applicant Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University. Utility model patent No. 182624 Russian Federation, IPC G01N 25/58 (2006.01). Test bench for reliability of windows and doors: No. 2018117084; application 07.05.2018; publ. 24.08.2018. 7 p. (In Russ.).
2. Lopushinsky V. I. Resistance of steam locomotives and wagons in motion and operation of a steam engine of a steam locomotive based on dynamometric and indicator experiments conducted in 1877–1879 on the Morshan-Syzran railway. St. Petersburg: Printing House of the Ministry of Railways named A. Behnke; 1883. 152 p. (In Russ.).
3. Astakhov P. N. Resistance to the movement of railway rolling stock. *Proceedings of the Central Research Institute of the Ministry of Railways*. Moscow: Transport; 1966. Issue. 311. 178 p. (In Russ.).
4. Volkov K. N., Emelyanov V. N. Modeling of large eddies in the calculations of turbulent flows. Moscow: Fizmatlit; 2008. 368 p. (In Russ.).
5. Aerodynamics of bodies when moving in tunnels (mine shafts): research report. St. Petersburg State University of Railway Engineering; head I. I. Chelnokov. N GR 75046741. St. Petersburg; 2005. 98 p. (In Russ.).
6. Romanenko G. A., Syuzumova E. I. Studies of the aerodynamic resistance of high-speed trains. *Some questions of experimental aerodynamics*. 1973. Issue. 24. P. 110–118. (In Russ.).
7. Lazarenko Yu. M., Kapustin A. N. Aerodynamic impact of the Sapsan high-speed electric train on passengers on platforms and on oncoming trains when crossing. *Bulletin of the Research Institute of Railway Transport*. 2012;(4):11–14. (In Russ.).
8. Churkov N. A. Aerodynamics of a railway train. Moscow: Zheldorizdat; 2007. 332 p. (In Russ.).
9. Soper D. The aerodynamics of a container freight train. *University of Birmingham Research Archive*. 2014. 371 p.
10. Mohammad A. R., Mohebbi M. Numerical calculations of aerodynamic performance for ATM train at crosswind conditions. *Wind and Structures*. 2014;18:529–548.
11. Sidorov O. A., Smerdin A. N., Chepurko A. E. Application of the CFD method to determine the aerodynamic forces of the pantograph and its aerodynamic device. *Electrification of transport*. 2013;(6):113–119. (In Russ.).
12. Vino G., Watkins S., Mousley P., Watmuff J., Prasad S. Flow structures in the near wake of the Ahmed model. *Journal of Fluids and Structures*. 2005;20:673–695.
13. Schulte-Werning B., Heine C., Matschke G. Unsteady wake characteristics of high speed trains. *PAMM Proceedings Applied Maths and Mechanics*. 2003;2:332–333.
14. Syuzumova E. M., Romanenko G. A. Evaluation of the quantitative and qualitative characteristics of the air resistance of a high-speed train. *Bulletin of the Research Institute of Railway Transport*. 1978;(4):31–34. (In Russ.).
15. Spalart P. R. Strategies for turbulence modeling and simulations. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2000;21:252–263.
16. Baker C. J., Dalley S. J., Johnson T., Quinn A., Wright N. G. The slipstream and wake of a high speed train. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F Journal of Rail and Rapid Transit*. 2001. P. 83–99.
17. Piomelli U., Balaras E. Wall-layer models for large-eddy simulations. *Annual review of fluid mechanics*. 2002;34:349–374.

Информация об авторе

В. А. Макаров – аспирант, ассистент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

Information about the author

V. A. Makarov – Postgraduate Student, Assistant of the Wagons and Carriage Economy Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University.

Статья поступила в редакцию 22.03.2022; одобрена после рецензирования 20.04.2022; принята к публикации 03.10.2022.

The article was submitted 22.03.2022; approved after reviewing 20.04.2022; accepted for publication 03.10.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья
УДК 624.27:699.842
doi 10.52170/1815-9265_2022_63_77

Снижение колебаний мостовых сооружений

Сергей Павлович Глушков¹, Виктор Иванович Кочергин^{2✉}, Дарья Андреевна Проворная³

^{1,2,3} Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

¹rcpl@ngs.ru

²vkplus2011@yandex.ru✉

³molokovada@gmail.com

Аннотация. Увеличение скорости движения поездов связано с проблемой возрастания динамических реакций железнодорожных мостов и, следовательно, риска возникновения резонансных явлений. Развертывание высокоскоростной сети железных дорог повышает потребность в инновационных строительных решениях для новых мостов и экономически эффективных методах модернизации существующих маршрутов, в том числе необходима разработка методов снижения вибрации мостовых перекрытий. Одним из таких методов является установка динамических гасителей колебаний на мостовом перекрытии для снижения вертикального ускорения балки моста или амортизаторов, установленных между пролетным строением моста и опорами. Существенным недостатком известных конструкций массовых демпферов гасителей колебаний является снижение эффективности дополнительных масс, возбуждающихся за счет колебаний моста при снижении амплитуды колебаний моста до малых величин. Кроме того, как правило, не учитывается такое явление, как эксцентриситет, возникающий при деформировании от движения поезда балки моста. Во время отклонения моста этот эксцентриситет может привести к вращению краев балки мостового перекрытия.

В данной работе предлагается использование демпферов гасителей колебаний с динамическими компенсаторами в виде установленных соосно несущим упругим элементам инерционных масс и связанных с основанием и пролетным строением мостового сооружения пружинами. Приведено теоретическое обоснование предлагаемых технических решений, позволяющих обеспечить надежную защиту от вибраций за счет более полной компенсации периодических сил и моментов, передаваемых несущими упругими элементами, силами и моментами противоположного направления от инерционных масс, колеблющихся в противофазе.

Ключевые слова: мост, балка моста, вибрация, виброзащитное устройство, демпфер гасителя колебания, коэффициент демпфирования

Для цитирования: Глушков С. П., Кочергин В. И., Проворная Д. А. Снижение колебаний мостовых сооружений // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 4 (63). С. 77–85. DOI 10.52170/1815-9265_2022_63_77.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Reduction of vertical acceleration bridge structure

Sergey P. Glushkov¹, Victor I. Kochergin^{2✉}, Darya A. Provornaya³

^{1,2,3} Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

¹rcpl@ngs.ru

²vkplus2011@yandex.ru✉

³molokovada@gmail.com

Abstract. The increase in the speed of trains is associated with the problem of increasing dynamic reactions of railway bridges and, consequently, the risk of resonant phenomena. The deployment of a high-speed railway network increases the need for innovative construction solutions for new bridges and cost-effective methods for upgrading existing routes, including the development of methods to reduce dynamic loads on bridge structures. One such method is to install dynamic vibration dampers on the bridge floor to reduce the vertical acceleration of the bridge beam or shock absorbers installed between the bridge span and the supports. A significant drawback of known designs of mass dampers of vibration dampers is reduction of efficiency of additional masses excited due to bridge oscillations at reduction of bridge oscillation amplitude to small values. In addition, as a rule, such a

phenomenon as eccentricity arising when the bridge beam deforms from the movement of the train is not taken into account. During bridge deflection, this eccentricity can cause the edges of the bridge floor beam to rotate.

In this work, it is proposed to use dampers of vibration dampers with dynamic compensators in the form of inertial masses installed coaxially with the supporting elastic elements and springs connected to the base and span structure of the bridge structure. The theoretical justification of the proposed technical solutions is presented, which make it possible to provide reliable protection against vibrations due to more complete compensation of periodic forces and moments transmitted by bearing elastic elements, forces and moments of the opposite direction from inertial masses oscillating in antiphase.

Keywords: bridge, bridge beam, vibration, vibration protection device, fluctuation quencher damper, damping coefficient

For citation: Glushkov S. P., Kochergin V. I., Provornaya D. A. Reduction of vertical acceleration bridge structure. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(63):77–85. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_63_77.

Введение

В настоящее время на магистральных железнодорожных линиях России осуществляется смешанное движение поездов. При этом использование скорости пассажирского поезда ограничено медленно идущими грузовыми поездами, что требует выполнения определенных мероприятий по увеличению пропускной способности железнодорожных магистралей. Однако увеличение скорости движения поездов через искусственные сооружения связано с появлением проблемы возрастания динамических реакций железнодорожных мостов и, следовательно, риска возникновения резонансных явлений. С точки зрения долговечности мостовых сооружений их динамическое поведение в этих условиях может оказаться непроектным. Таким образом, организация скоростного и высокоскоростного железнодорожного сообщения в Российской Федерации повышает потребность в инновационных строительных решениях для новых мостов и экономически эффективных методах модернизации существующих мостовых сооружений.

Для реализации таких решений необходимо разработать стратегию снижения вибрации мостовых перекрытий, пригодную в качестве метода модернизации существующих мостов, а также в качестве экономически эффективной альтернативы при проектировании новых мостовых конструкций. В настоящее время к такой стратегии можно отнести установку динамических гасителей колебаний на мостовом перекрытии для снижения вертикального ускорения палубы моста или амортизаторов, установленных между пролетным строением моста и опорами. Вибрации, вызванные движением подвижного состава же-

лезнодорожного транспорта и метрополитена, считаются одними из самых вредных вибрационных воздействий для зданий и сооружений [1]. Поэтому исследование влияния амортизирующих устройств, которые установлены между настилом моста и опорами, на ускорение вертикального настила моста, а также влияния изменений и неопределенностей различных параметров мостовых сооружений при движении поездов на эффективность амортизаторов является актуальной задачей.

Материалы и методы исследования

Демпфирующие устройства можно разделить на три основные группы: пассивные, активные и полуактивные системы управления. На протяжении многих лет мнения исследователей относительно общих определений, различных типов демпфирующих устройств, разделяющих их на пассивные и активные, расходились. Однако, по нашему мнению, следует считать, что есть два существенных отличия между пассивным и активным устройством управления:

- в отличие от активной системы, которая имеет реальные временные настройки и управляет структурой за счет регулируемой входной энергии, пассивная система не способна вводить механические силы в первичную структуру;

- в отличие от пассивного устройства активный демпфер требует для своей работы наличия источника питания.

Согласно недавно принятым определениям, полуактивное устройство рассматривается как компромисс между пассивной и активной системами. Причина этого заключается в том, что оно обладает возможностью изменения активного устройства, но не вводит никакой дополнительной входной энергии в управляемую структуру

и имеет очень низкие требования к энергопотреблению. Известно, что активные системы управления улучшают структурные характеристики на более высоком уровне, чем эквивалентные пассивные аналоги. С другой стороны, пассивные демпфирующие устройства превосходят их с точки зрения технической надежности, надежности обслуживания и экономической эффективности. К таким устройствам можно отнести амортизатор с вязкой силиконовой жидкостью. С помощью поршня с небольшими отверстиями жидкость может перемещаться между двумя камерами внутри цилиндра, расположенными по разные стороны головки поршня. Вследствие вязкости демпфирующей жидкости движение амортизатора будет рассеивать энергию от контролируемой конструкции и генерировать выходные силы демпфера, которые не совпадают по фазе с входным смещением [2]. В случае линейной, чисто вязкой демпфирующей жидкости с коэффициентом демпфирования c_d выходная сила P_d будет пропорциональна скорости поршня v_d :

$$P_d = c_d v_d. \quad (1)$$

Первоначально амортизаторы с вязкой жидкостью широко использовались в военной и аэрокосмической отраслях. Начиная с 1990-х гг. применение пассивных амортизаторов с вязкой жидкостью для смягчения чрезмерных структурных вибраций достигло области гражданского строительства. Однако основная сфера применения амортизаторов была ограничена сооружениями, подверженными сейсмической активности. Впоследствии пассивные амортизаторы были применены и для других типов структурных систем и вариантов нагрузки. Например, пешеходный мост в Лондоне был оснащен гибридной системой «пассивный вязкостной демпфер – динамический гаситель колебаний» для уменьшения сильных колебаний, вызванных движением пешеходов [3].

Традиционный подход к учету классического или пропорционального затухания колебаний в мостах заключается в предположении, что энергия равномерно рассеивается вдоль балки. Данное упрощение оправдано, если задействованные собственные моды ортогональны и не связаны между собой. Если это применимо, то справедливо предположить, что затухание пропорционально массе и

жесткости системы и, следовательно, проблема собственных значений может быть решена линейной комбинацией этих объектов. Однако процедура вычисления амплитуд затухающих собственных частот и формы мод колебаний усложняется, если система непропорционально затухает.

Эффективность демпфера зависит от скорости воздействия нагрузки и поэтому точный выбор величины коэффициента демпфирования в динамических гасителях колебаний существенно влияет на динамические характеристики настила. По сравнению с традиционным модальным анализом отклик, полученный при рассмотрении сложных мод, более надежный и, следовательно, должен использоваться при оценке динамического поведения мостов с непропорциональным затуханием. Затухающие собственные моды могут быть использованы для определения максимально достижимого демпфирования, а также для оптимальной настройки амортизаторов под динамические параметры конкретных мостовых сооружений.

Метод суперпозиции сложных режимов должен быть применим как для просто поддерживаемых, так и для непрерывных балок с общими конечными условиями. Удобство использования такой модели продемонстрировано, в частности, в случае применения дополнительных демпфирующих устройств при исследовании влияния линейных затуханий, соединяющих настил моста с продольно натянутой, просто поддерживаемой вспомогательной балкой, как показано на рис. 1 [4]. Включение вязкого демпфера в мостовое сооружение с системой вспомогательных балок позволило значительно снизить отклик мостового перекрытия.

Кроме настроенных жидкостных демпферов, наиболее распространенным в области гражданского строительства является настроенный массовый демпфер гасителя колебаний (ДГК). Его можно описать как механическую систему амортизаторов с пружинной массой, предназначенной для того, чтобы резонировать с движением основной конструкции и, следовательно, противодействовать ему, создавая равные и противоположные силы (рис. 2).

Традиционно ДГК устанавливались в крупных зданиях для уменьшения вибраций, вызван-

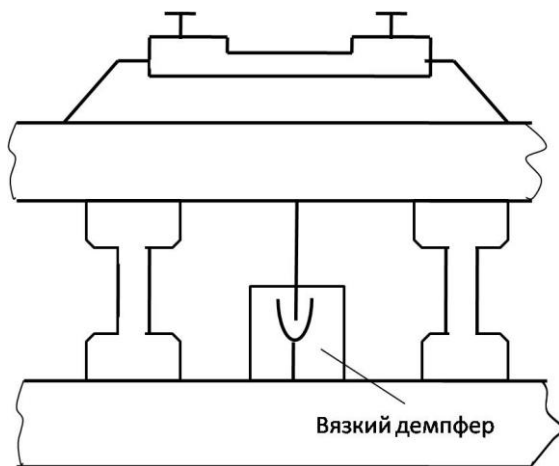


Рис. 1. Модернизированный мост с системой вспомогательных балок

ных в основном ветровой нагрузкой и сейсмическими явлениями. Концепция устройств для демпфирования массы восходит к началу XX в., когда был изобретен динамический вибропоглотитель, уменьшающий вибрации тел, подвергающихся периодическим воздействиям. Однако это устройство не включало демпфирующий элемент, что приводило к недостаткам гашения вибрации, если частота возбуждения отклонялась от частоты поглотителя. С целью уменьшения амплитуды колебаний в более широком диапазоне частот по сравнению с исходным незатухающим поглотителем возможно размещение демпфера параллельно пружине, поддерживающей инерционную массу, подвергнутую гармонической нагрузке. Процедуры определения оптимального демпфирования ξ_d и частоты настройки f_d ДГК при определенном соотношении масс μ следующие:

$$f_d = \frac{1}{1 + \mu}; \quad (2)$$

$$\xi_d^2 = \frac{3\mu}{8(1 + \mu)}. \quad (3)$$

Путем минимизации дисперсии отклика было подтверждено, что оптимальные параметры ДГК варьируются в зависимости от типа внешней нагрузки. Известно, что эффективность использования пассивного ДГК мостовых сооружений может снижаться в результате взаимодействия между мостом и поездом и возникновения эффекта расстройки частот из-за разницы между узкополосной частотой возбуждения и основной частотой моста. Расстройка ча-

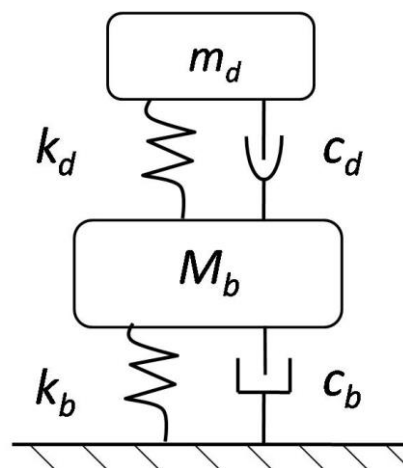


Рис. 2. Массовый демпфер гасителя колебаний

стот также может произойти из-за изменений условий окружающей среды, неопределенности в структурных свойствах или в процессе изготовления устройств.

Исследования в области сравнения детерминированного и стохастического подходов к оптимизации ДГК с учетом неопределенных свойств основной структуры показали, что неопределенности влияют на оптимальные свойства демпфера и, таким образом, должны быть учтены для получения надежного конструктивного решения ДГК. Другой мерой, которая была предложена для уменьшения эффекта расстройки, является установка системы с несколькими ДГК. Например, система, изображенная на рис. 3, охватывает более широкую полосу частот, чем один ДГК [5, 6].

Один ДГК может быть эффективен, если собственные частоты были широко разделены, а система из ДГК, настроенная на разные частоты, является предпочтительной и обладает более надежными свойствами в условиях сбоя в случае близко расположенных собственных мод колебаний.

Полуактивные ДГК с регулируемой жесткостью путем изменения свойств сбрасываемого элемента позволяют снизить эффект расстройки по частотам и, таким образом, обеспечить оптимальное управление даже при изменении структурных свойств основной системы. При этом существенным недостатком всех устройств массовых ДГК является то, что при снижении амплитуды колебаний моста до малых величин снижается и эффективность

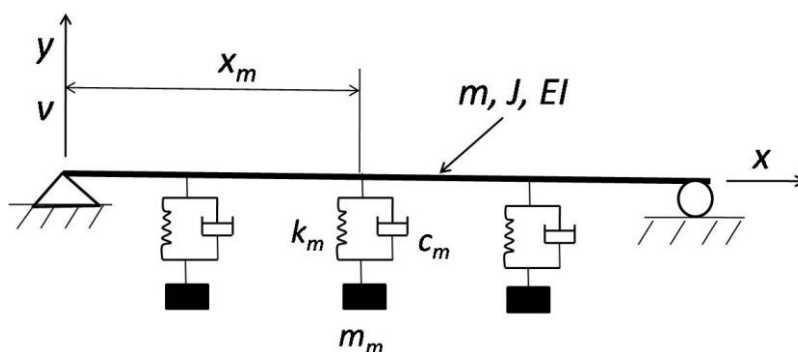


Рис. 3. Балка Тимошенко с настроенными амортизаторами массы

дополнительных масс, так как они возбуждаются за счет колебаний моста.

Результаты и их анализ

Избавиться от указанных недостатков существующих конструктивных решений ДГК, а следовательно и снизить колебания мостовых сооружений возможно при использовании предлагаемой конструкции устройства ДГК с динамическим компенсатором (рис. 4) [7–9]. Устройство состоит из несущего упругого элемента 1 в виде винтовой пружины и динамического компенсатора в виде соосно установленной инерционной массы 2, связанной с основанием и пролетным строением моста верхней и нижней пружинами 3 и 4. Более полная защита от вибраций в данном случае обеспечивается за счет компенсации периодических сил и моментов, передаваемых несущими упругими элементами, силами и моментами противоположного направления от инерционной массы, колеблющейся в противофазе колебаниям защищаемого основания.

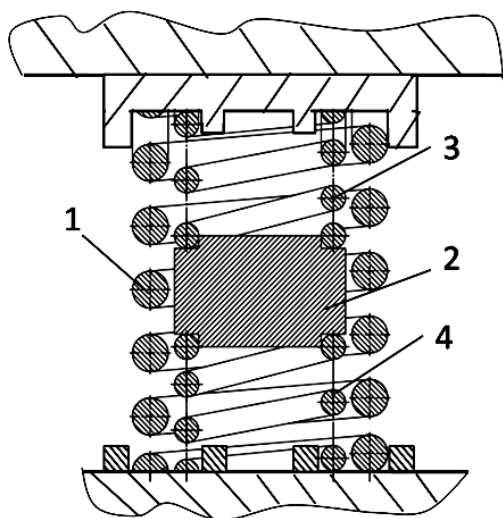


Рис. 4. ДГК с динамическим компенсатором

Рассматривая балку, лежащую на опорах, видим, что нейтральная ось моста расположена близко к верхней поверхности, а это приводит к эксцентриситету опор, который необходимо учитывать в моделях [10]. Во время отклонения моста этот эксцентриситет может привести к вращению краев балки при преодолении трения подвижного подшипника. Как следствие, все точки, расположенные вдоль моста, получают дополнительное силовое воздействие в горизонтальном направлении вследствие нагрузки по r -й оси от движения поезда $F_d(t)$. Это означает, что ДГК можно разместить ближе к опорам под таким углом наклона, который позволит совместить центр тяжести моста и ось воздействия силы ДГК. Предлагаемая стратегия снижения вибрации включает в себя набор ДГК, установленных между настилом моста и опорами, как показано на рис. 5. На рисунке условно изображено, что оси крепления демпферов пересекаются в центре масс балки моста Y .

Управляющее уравнение движения балки Эйлера – Бернулли может быть описано линейно упругим осциллятором с вязким затуханием в терминах смещения u , а также его производных по времени: скорости v и ускорения a . С помощью модального анализа динамический отклик может быть выражен как взвешенная сумма различных режимов естественной вибрации, которые в сочетании способны описать любую возможную деформированную форму конструкции. Это получается путем разделения переменных в соответствии с теоремой о разложении. Следовательно, смещение и его производные по времени равны и задаются в терминах обобщенных координат $q_n, \dot{q}_n, \ddot{q}_n$ режима вибрации $\varphi_n(x)$:

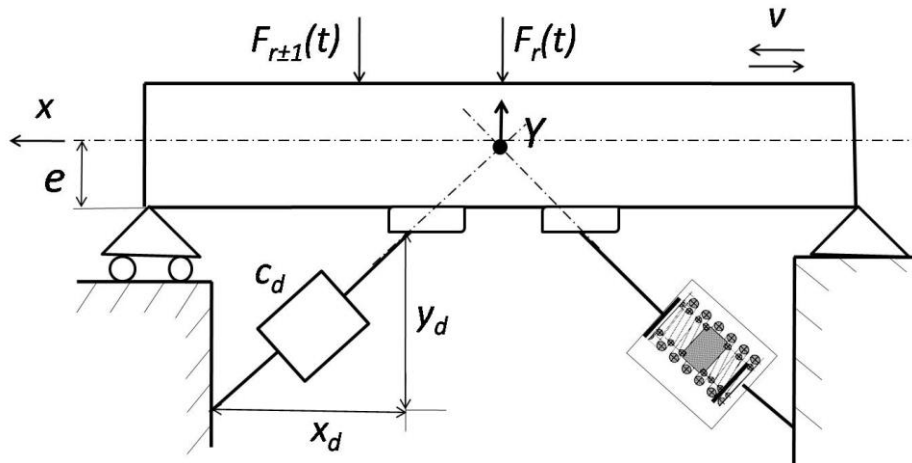


Рис. 5. Система демпферов гасителей колебаний:

α – угол наклона; C_d – коэффициент демпфирования; e – эксцентриситет; x_d и y_d – горизонтальные и вертикальные координаты положения ДГК соответственно

$$\begin{aligned} u(x, T) &= \sum_n^\infty \varphi_n(x) q_n(t), \\ \dot{u}(x, T) &= \sum_n^\infty \varphi_n(x) \dot{q}_n(t), \\ \ddot{u}(x, T) &= \sum_n^\infty \varphi_n(x) \ddot{q}_n(t). \end{aligned} \quad (4)$$

Умножением на $\varphi_n(x)$ получим следующее выражение для уравнения движения в модальных координатах:

$$m_{b,n} \ddot{q}_n + c_{b,n} \dot{q}_n + k_{b,n} q_n = F_n(t). \quad (5)$$

В выражении (5) модальная масса $m_{b,n}$, демпфирование $c_{b,n}$ и жесткость $k_{b,n}$ задаются как

$$\begin{aligned} m_{b,n} &= \int_0^L m(x) \varphi_n(x)^2 dx; \\ c_{b,n} &= \int_0^L c(x) \varphi_n(x)^2 dx; \\ k_{b,n} &= \int_0^L EI(x) \varphi_n(x)^2 dx, \end{aligned} \quad (6)$$

где m – масса на единицу длины; E – модуль упругости; I – момент инерции.

Выражение для внешней модальной силы $F_n(t)$ может варьироваться в зависимости от источника возбуждения, которому подвергается система. Применительно к железнодорожному движению один из подходов заключается в моделировании поездной нагрузки как группы сосредоточенных сил с определенным набором характерных расстояний между ними. Эти расстояния обычно равноудалены и отображаются с повторяющимися интервалами. Исходя из этого модальная сила может быть выражена как сумма функций амплитуды:

$$F_n(t) = \sum_{r=1}^R F_r \varepsilon_r(t) \varphi_n(vt - d_r), \quad (7)$$

где F_r – нагрузка от r -й оси; v – скорость движения поезда; d_r – расстояние от оси r до первой точки балки.

Функция от времени $\varepsilon_r(t)$ определяется выражением:

$$\varepsilon_r(t) = H[t - d_r / v] - H[t - (d_r + L) / v], \quad (8)$$

где $H(t)$ – шаговая функция Хевисайда, т. е. кусочно-постоянная функция; L – длина пролета моста.

Шаговая функция Хевисайда равна нулю для отрицательных значений аргумента и единице – для положительных:

$$H(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } t < 0, \\ 1, & \text{если } t \geq 0. \end{cases} \quad (9)$$

Поскольку формы режимов колебаний мостовых сооружений не зависят от формы колебаний демпферов, коэффициенты демпфирования $c_{b,n}$ и жесткости $k_{b,n}$ ДГК должны быть включены в модальное уравнение движения:

$$\begin{aligned} m_{b,n} \ddot{q}_n + (c_{b,n} + c_{d,n}) \dot{q}_n + \\ + (k_{b,n} - k_{d,n}) q_n = F_n(t). \end{aligned} \quad (10)$$

Другое явление, которое должна содержать математическая модель, – это эксцентриситет e . Он может быть включен в качестве модельной координаты вдоль линии действия ДГК. Вывод этой координаты основан на вертикальной составляющей смещения моста:

$$u_{b,n} = \varphi_n(x) q_n. \quad (11)$$

Из-за эксцентриситета результирующая горизонтальная составляющая описывается как

$$u_{r,n} = e q'_n(x) q_n. \quad (12)$$

Общая длина l ДГК в любой момент времени равна сумме начальной длины l_0 и изменения длины Δl из-за сжатия или удлинения амортизаторов (рис. 6).

В этой модели предполагается, что опора полностью зафиксирована. Следовательно, общая длина l определяется как

$$l = l_0 + \Delta l = \sqrt{[x_d + u_{r,s,n}(x_d) + u_{r,s,n}]^2 + [y_d + u_{b,n}(x_d)]^2}, \quad (13)$$

где $u_{r,s,n}$ – горизонтальное смещение несущей опоры.

В соответствии с простой геометрией применяется следующее условие:

$$l_0^2 = x_d^2 + y_d^2. \quad (14)$$

Опуская остальные члены второго порядка из-за незначительности их влияния, приведем уравнение (13) к следующему виду:

$$\Delta l = \frac{[x_d u_{r,n}(x_d) + x_d u_{r,s,n} + y_d u_{b,n}(x_d)]}{l_0}. \quad (15)$$

Применяя правила геометрии, можно записать:

$$l_0 = \frac{x_d}{\cos \alpha}; \quad \frac{x_d}{y_d} = \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha}. \quad (16)$$

Следовательно, изменение длины присоединенного ДГК можно выразить как

$$\Delta l = [u_{r,n}(x_d) + u_{r,s,n}] \cos \alpha + u_{d,n}(x_d) \sin \alpha. \quad (17)$$

Поскольку величина Δl эквивалентна смещению вдоль линии действия амортизаторов, она может быть обозначена как $u_{d,n}$.

Вставим уравнения (11) и (12) в выражение (17). В результате получаем:

$$u_{d,n} = [e \varphi'_n(x_d) \cos \alpha + e \varphi'_{s,n} \cos \alpha + \varphi_n(x_d) \sin \alpha] q_n. \quad (18)$$

Дифференцирование по времени позволяет определить скорость вдоль линии действия амортизаторов:

$$\dot{u}_{d,n} = [e \varphi'_n(x_d) \cos \alpha + e \varphi'_{s,n} \cos \alpha + \varphi_n(x_d) \sin \alpha] \dot{q}_n. \quad (19)$$

Данное уравнение можно представить в виде

$$\dot{u}_{d,n} = \psi_{d,n} \dot{q}_n. \quad (20)$$

Анализируя выражение (20), отметим, что из-за эксцентриситета выводится новая координата, полностью основанная на исходном режиме вибрации. Для ряда ДГК общий дополнительный коэффициент демпфирования для n -го режима вибрации определяется как

$$c_{d,n} = \sum_{j=1}^J c_{d,j} \psi_{d,n}(\alpha_j, x_{d,j})^2. \quad (21)$$

Полученное уравнение (21) включается в уравнение (10). Это означает, что два существенных явления включены в исследуемую модель. Результирующий отклик в терминах u , \dot{u} , \ddot{u} может быть получен с помощью раз-

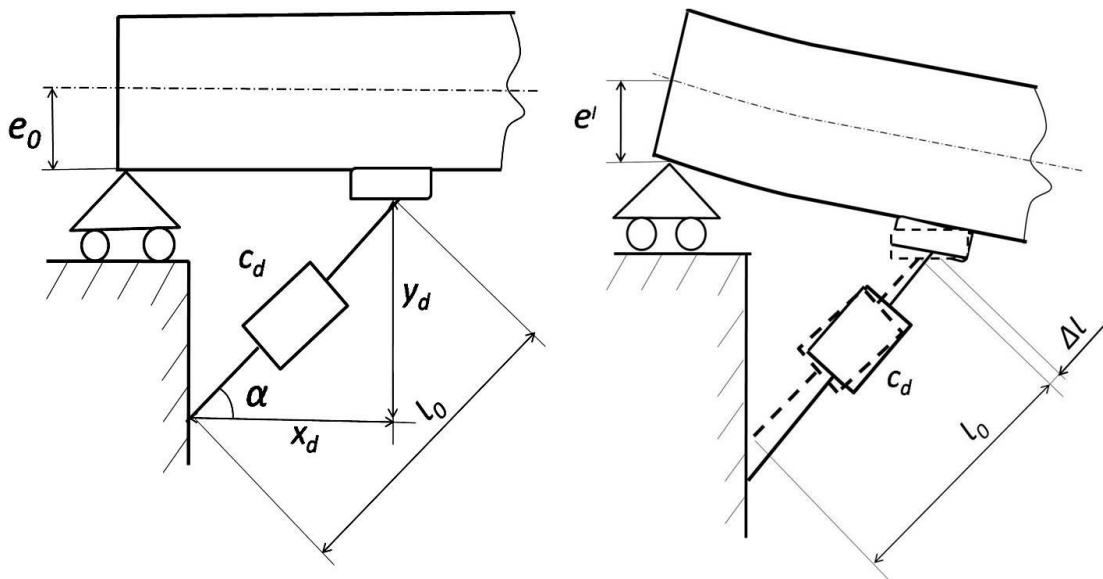


Рис. 6. Изменение длины Δl ДГК из-за отклонения балки моста с вертикальными и горизонтальными перемещениями:

l_0 – начальная длина ДГК; α – угол наклона; x_d и y_d – начальные координаты точки крепления ДГК

личных методов решения (например, численных методов с шагом по времени) с последующей суперпозицией режимов в соответствии с уравнением (4).

Выводы

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Существенным недостатком известных конструкций массовых ДГК является снижение эффективности дополнительных масс, возбуждающихся за счет колебаний моста при снижении амплитуды колебаний моста до малых величин.

2. Использование предложенного конструктивного решения ДГК, оснащенных динамическими компенсаторами в виде установленных соосно несущим упругим элементам инерционных масс и связанных с основанием

и пролетным строением мостового сооружения пружинами, позволит обеспечить более полную защиту от вибраций за счет компенсации периодических сил и моментов, передаваемых несущими упругими элементами, силами и моментами противоположного направления от инерционных масс, колеблющихся в противофазе колебаниям защищаемого основания.

3. Предложенное математическое описание процессов демпфирования железнодорожных мостовых сооружений позволяет учесть наличие двух объективно существующих явлений: представление поездной нагрузки как группы сосредоточенных сил с определенным набором характерных расстояний между ними и эксцентриситет, возникающий при деформировании от движения поезда балки моста.

Список источников

1. Козлова Н. А., Мишина В. М. О методах виброзащиты фундаментов зданий в условиях города // Наука, образование и экспериментальное проектирование. 2020. № 1. С. 208–210.
2. Castaldo P. Passive energy dissipation devices // Integrated seismic design of structures and control systems. Switzerland : Springer International Publishing, 2014. P. 21–62. DOI 10.1007/978-3-319-02615-22.
3. The Millennium Bridge, London: Problems and solutions / P. Dallard [et al.] // Structural Engineer. Project: London Millennium Pedestrian Bridge. 2001. Vol. 79, no. 8. P. 15–17.
4. Museros P. M., Martinez-Rodrigo M. D. Vibration control of simple support beams under moving loads using liquid viscous shock absorbers // Technic Sound and Vibration log. 2007. Vol. 300, iss. 1-2. P. 292–315. DOI 10.1016/J.JSV.2006.08.007.
5. Méndez-Sánchez R. A., Morales A., Flores J. Experimental check on the accuracy of Timoshenko's beam theory // Journal of Sound and Vibration. 2005. Vol. 279. P. 508–512.
6. Franco-Villafañe J. A., Méndez-Sánchez R. A. On the Accuracy of the Timoshenko Beam Theory Above the Critical Frequency: Best Shear Coefficient // Journal of Mechanics. 2016. January. P. 1–4. DOI 10.1017/jmech.2015.104.
7. Патент № 2082907 Российская Федерация, МПК F15F 15/00. Устройство для виброизоляции машин : № 93035915/28 : заявл. 27.06.93 : опубл. 27.06.97. Бюл. № 18 / Барановский А. М., Глушков С. П.
8. Glushkov S. P., Kochergin V. I. Improvement of Machine Protection against Vibration // Transportation Research Procedia. XII International Conference on Transport Infrastructure. 2022. Vol. 61. P. 674–680. DOI 10.1016/j.trpro. 2022.01.107.
9. Патент № 201850 Российская Федерация, МПК B61F 5/30, B61F 5/12, F16F 7/10, F16F 7/104. Тележка рельсового транспортного средства : № 2020131954 : заявл. 24.09.20 : опубл. 15.01.21. Бюл. № 2 / Глушков С. П., Кочергин В. И. ; заявитель СГУПС.
10. Fransson H. Rotation capacity of reinforced high strength concrete beams // Licentiate Thesis. Stockholm, 1997. Bulletin 32.

References

1. Kozlova N. A., Mishina V. M. On methods of vibration protection of building foundations in urban conditions. *Science, education and experimental design*. 2020;(1):208–210. (In Russ.).
2. Castaldo P. Passive energy dissipation devices. *Integrated seismic design of structures and control systems*. Switzerland : Springer International Publishing; 2014. P. 21–62. DOI 10.1007/978-3-319-02615-22.
3. Dallard P. [et al]. The Millennium Bridge, London: Problems and solutions. *Structural Engineer. Project: London Millennium Pedestrian Bridge*. 2001;79(8):15–17.

4. Museros P. M., Martinez-Rodrigo M. D. Vibration control of simple support beams under moving loads using liquid viscous shock absorbers. *Technic Sound and Vibration log.* 2007;300(1-2):292–315. DOI 10.1016/J.JSV.2006.08.007.
5. Méndez-Sánchez R. A., Morales A., Flores J. Experimental check on the accuracy of Timoshenko's beam theory. *Journal of Sound and Vibration.* 2005;279:508–512.
6. Franco-Villafañe J. A., Méndez-Sánchez R. A. On the Accuracy of the Timoshenko Beam Theory Above the Critical Frequency: Best Shear Coefficient. *Journal of Mechanics.* 2016;January:1–4. DOI 10.1017/jmech.2015.104.
7. Patent 2082907 Russian Federation, MPK F15F 15/00. Device for vibration insulation of machines. A. M. Baranovskij, S. P. Glushkov. № 93035915/28. 15.01.21. Bulletin № 18. (In Russ.).
8. Glushkov S. P., Kochergin V. I. Improvement of Machine Protection against Vibration. *Transportation Research Procedia. XII International Conference on Transport Infrastructure.* 2022;61:674–680. DOI 10.1016/j.trpro. 2022.01.107.
9. Patent 201850 Russian Federation, MPK B61F 5/30, B61F 5/12, F16F 7/10, F16F 7/104. Rail vehicle trolley. S. P. Glushkov. V. I. Kochergin. STU. № 2020131954. 15.01.21. Bulletin № 2. (In Russ.).
10. Fransson H. Rotation capacity of reinforced high strength concrete beams. *Licentiate Thesis.* Stockholm; 1997. Bulletin 32.

Информация об авторах

С. П. Глушков – профессор кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» Сибирского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук.

В. И. Кочергин – заведующий кафедрой «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» Сибирского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук.

Д. А. Проворная – аспирант кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

S. P. Glushkov – Professor of the Transport Engineering Technology and Machine Operation Department, Siberian Transport University, Doctor of Engineering.

V. I. Kochergin – Head of the Transport Engineering Technology and Machine Operation Department, Siberian Transport University, Doctor of Engineering.

D. A. Provornaya – Postgraduate Student of the Transport Engineering Technology and Machine Operation Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 18.04.2022; одобрена после рецензирования 19.05. 2022; принята к публикации 03.10.2022.

The article was submitted 18.04.2022; approved after reviewing 19.05. 2022; accepted for publication 03.10.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья
УДК 624.974:621.311.1
doi 10.52170/1815-9265_2022_63_86

Анализ расчета стальных конструкций ЛЭП по современным нормативно-техническим документам

Алексей Анатольевич Новоселов¹, Наталья Сергеевна Пичкурова²✉

^{1,2} Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

¹ alex19732009@mail.ru

² nataliapich@mail.ru ✉

Аннотация. Опыт эксплуатации линий электропередачи показал, что, помимо обрыва проводов и тросов, возможно разрушение отдельных элементов опор в результате динамических воздействий, которые влияют на сооружение в течение всего срока эксплуатации. Нормативно-технические документы по расчету подобных конструкций претерпели ряд изменений в сторону увеличения нагрузок, расчетных коэффициентов и пр. Однако до сих пор нередко случаи строительства ЛЭП по типовым сериям, разработанным в середине XX в., не соответствующим требованиям действующих в настоящее время норм.

В статье проведен анализ изменений в нормативно-технических документах в расчетах гололеда, ветра и самих элементов ЛЭП. Так, вес гололеда на проводах на 1 пог. м увеличился в 3 раза, толщина стенки гололеда на высоте 10 м – в 2 раза, а нормативное давление ветра – в 1,5 раза по сравнению с теми требованиями, которые действовали в середине XX в.

Проведен анализ напряженного состояния трех разных опор башенного типа, смоделированных в ПК SCAD по типовым сериям, но рассчитанных по действующим нормативным документам. Опоры различаются по высоте, типу (промежуточные и анкерно-угловые), ветровому и весовому пролету, ветровому и гололедному районам, а также по видам сечений конструктивных элементов. Расчет показал, что у большинства конструктивных элементов опор не обеспечена предельная гибкость элементов. Таким образом, для соответствия сооружений требованиям надежности необходимо провести замену сечений элементов, что в свою очередь приведет к увеличению общей массы опоры.

Результаты проведенных расчетов планируется использовать для дальнейших исследований в области повышения надежности, долговечности и экономичности стальных опор ЛЭП.

Ключевые слова: линии электропередачи, конструктивные решения, надежность, оценка напряженно-деформированного состояния

Для цитирования: Новоселов А. А., Пичкурова Н. С. Анализ расчета стальных конструкций ЛЭП по современным нормативно-техническим документам // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 4 (63). С. 86–93. DOI 10.52170/1815-9265_2022_63_86.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Computational analysis of power transmission line steel structures according to modern regulatory and technical documents

Alexey A. Novoselov¹, Natalia S. Pichkurova²✉

^{1,2} Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

¹ alex19732009@mail.ru

² nataliapich@mail.ru ✉

Abstract. Experience in the operation of power lines has shown that in addition to the breakage of wires and cables, the destruction of individual elements of the supports is possible as a result of those dynamic effects that act on the structure during the entire period of operation. Normative and technical documents for the calculation of such structures have undergone a number of changes in the direction of increasing loads, design coefficients, etc. However, it is still not uncommon for the construction of power transmission lines according to standard series developed in the middle of the 20th century, and not meeting the requirements of the current standards.

The article analyzes the changes that have occurred in the normative and technical documents, in the calculation of ice, wind and the elements of power lines themselves. Thus, the weight of ice on wires increased by

3 times per linear meter, the thickness of the ice wall at a height of 10 m increased by 2 times, and the standard wind pressure by 1.5 times compared to the requirements that were in force in the middle of the 20th century.

The analysis of the stress state of three different tower-type supports, modeled in the SCAD software according to standard series, but calculated according to the current regulatory documents, was carried out. The supports differ from each other in height, type (intermediate and anchor-angle), wind and weight span, wind and ice areas, as well as in the types of sections of structural elements. The calculation showed that the majority of the structural elements of the supports do not provide the ultimate flexibility of the elements. Thus, in order to meet the reliability requirements of structures, it is necessary to replace the sections of the elements, which in turn leads to an increase in the total mass of the transmission line.

The results of the calculations performed are planned to be used for further research in the field of improving the reliability, durability and efficiency of steel pylons for power transmission lines.

Keywords: power lines, design solutions, reliability, assessment of the stress-strain state

For citation: Novoselov A. A., Pichkurova N. S. Computational analysis of power transmission line steel structures according to modern regulatory and technical documents. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(63):86–93. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_63_86.

Введение

Воздушные линии электропередачи (ЛЭП) – система энергетического оборудования, предназначенная для передачи и распределения электрической энергии по проводам, находящимся на открытом пространстве и прикрепленным к опорам с помощью специальных устройств. Элементы ЛЭП находятся в сложных условиях: подвержены атмосферным осадкам (в частности, гололеду), ветровым нагрузкам различного направления и амплитуды, коррозии материала, а также ряду воздействий, отличных от нормального режима эксплуатации.

Наибольший объем линий электропередачи был введен в 60–80-х гг. XX в. В настоящее время нормативные рекомендуемые сроки их эксплуатации либо закончились, либо скоро закончатся. Это касается и стальных опор ЛЭП с нормативным сроком эксплуатации 50 лет. В ближайшее время возникнет достаточно серьезная проблема по обеспечению надежности элементов ЛЭП. В работе [1] указано, что по тяжести последствий отказа на первом месте стоят конструкции опор: отказы опор составляют примерно 9–13 %.

На снижение несущей способности существующих опор в первую очередь влияет старение материалов, а также накопленные в процессе эксплуатации различные дефекты. Кроме того, существенное влияние оказывает недоучет нормативными документами прошлых лет действующих на момент строительства нагрузок. Эти данные подтверждаются исследованиями, представленными в работах [2–5].

На рис. 1 показано распределение причин повреждений элементов ЛЭП по данным ра-

боты [6]. Так, самый большой процент повреждений связан с нерасчетными режимами сети и дефектами при эксплуатации.

Материалы и методы исследования

Существенно на несущую способность влияют ветровые и гололедные нагрузки [4, 7, 8]. По данным работы [9], 33,7 % отказов металлических опор связаны с ветровыми нагрузками; 13,2 % – с ветровыми и гололедными. Для железобетонных опор ситуация несколько иная: 21,7 % отказов связаны с ветровыми нагрузками и 24,8 % – с ветровыми и гололедными. Однако следует уточнить, что в данной статье исследования проводились только для опор в металлическом исполнении.

В работе [10] при анализе причин произошедшей аварии было выявлено, что вес гололеда на проводах на 1 пог. м в существующих нормативных документах (Правилах устройства электроустановок ПУЭ-7 [11]) *увеличился в 3 раза* по сравнению с нормативными значениями на момент проектирования, приведенными в Правилах устройства электроустановок ПУЭ-3 [12]: с 2,04 до 6,03 кг/м.

Изменения коснулись и нормативных значений толщины стенки гололеда на высоте 10 м: значения, приведенные в табл. II-5-2 ПУЭ-3 [12] и в табл. 2.5.3 ПУЭ-7 [11], различаются практически *в 2 раза*.

Для ветровой нагрузки величина нормативного давления ветра *увеличилась в 1,5 раза* (табл. II-5-1 [12] и 2.5.1 [11]). При этом следует учитывать, что ветровая нагрузка на провода, покрытые льдом, будет также существенно выше.

При анализе нормативных документов по расчету стальных конструкций – СНиП II-В.3-72

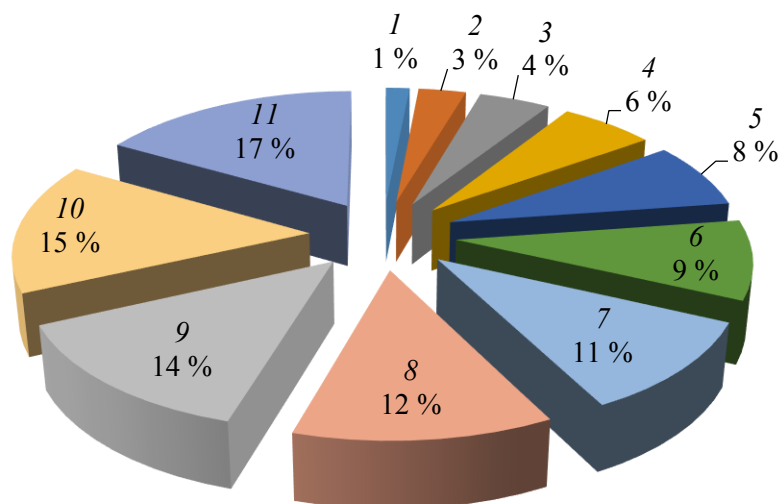


Рис. 1. Основные причины повреждения элементов ЛЭП:

1 – потеря несущей способности, износ, коррозия; 2 – гололедно-ветровые нагрузки; 3 – посторонние воздействия; 4 – атмосферные перенапряжения; 5 – хищение элементов опор (проводов); 6 – дефекты при строительстве и монтаже; 7 – ошибки проектировщиков, заводские дефекты; 8 – стихийные явления; 9 – дефекты при эксплуатации; 10 – нерасчетные режимы; 11 – птицы, загрязнения изоляции

[13] и СП 16.13330.2017 [14] – можно отметить, что серьезных изменений не произошло. Расчет прочности и устойчивости центрально сжатых и центрально растянутых элементов проводится по идентичным формулам.

Рассмотрим более внимательно расчет центрально сжатых элементов на устойчивость. В действующей редакции СП 16.13330.2017 [14] расчет необходимо выполнять согласно п. 7.1.3 по следующей формуле:

$$\frac{N}{\varphi A R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (1)$$

где N – внешние усилия; φ – коэффициент устойчивости при центральном сжатии; A – площадь сечения брутто; R_y – расчетное сопротивление стали растяжению, сжатию, изгибу по пределу текучести; γ_c – коэффициент условий работы.

Значение φ при $\bar{\lambda} \geq 0,6$ следует определять по формуле

$$\varphi = 0,5(\delta - \sqrt{\delta^2 - 39,48 \bar{\lambda}^2}) / \bar{\lambda}^2, \quad (2)$$

где $\bar{\lambda} = \lambda \sqrt{R_y / E}$ – условная гибкость стержня.

Значение коэффициента δ определяется как

$$\delta = 9,87(1 - \alpha + \beta \bar{\lambda}) + \bar{\lambda}^2, \quad (3)$$

где α и β – коэффициенты, которые принимают по табл. 7 [14] в зависимости от типов сечений.

Согласно СНиП II-B.3-72 [13], устойчивость центрально сжатых элементов определялась по следующей формуле:

$$\frac{N}{\varphi F m} \leq R, \quad (4)$$

где φ – коэффициент продольного изгиба, определяемый по табл. 50 прил. I [13]; F – площадь сечения элемента брутто; m – коэффициент условий работы; R – сопротивление материала.

На рис. 2 приведен график сравнения коэффициентов продольного изгиба φ , определенных по двум нормативным документам, для стали с расчетным сопротивлением 210 МПа.

Из рис. 2 видно, что при гибкости элемента более 130 значение коэффициента в обоих нормативных документах практически не различается (разница составляет не более 5 %). Как правило, гибкость элементов опор обычно находится в пределах 100–220, следовательно, итоговые напряжения мало зависят от изменений требований нормативных документов.

Значения коэффициентов условий работы γ_c или m за прошедшее время не изменились. Так, например, для сжатых элементов решетки пространственных решетчатых конструкций из одиночных уголков, прикрепляемых одной полкой непосредственно к поясам

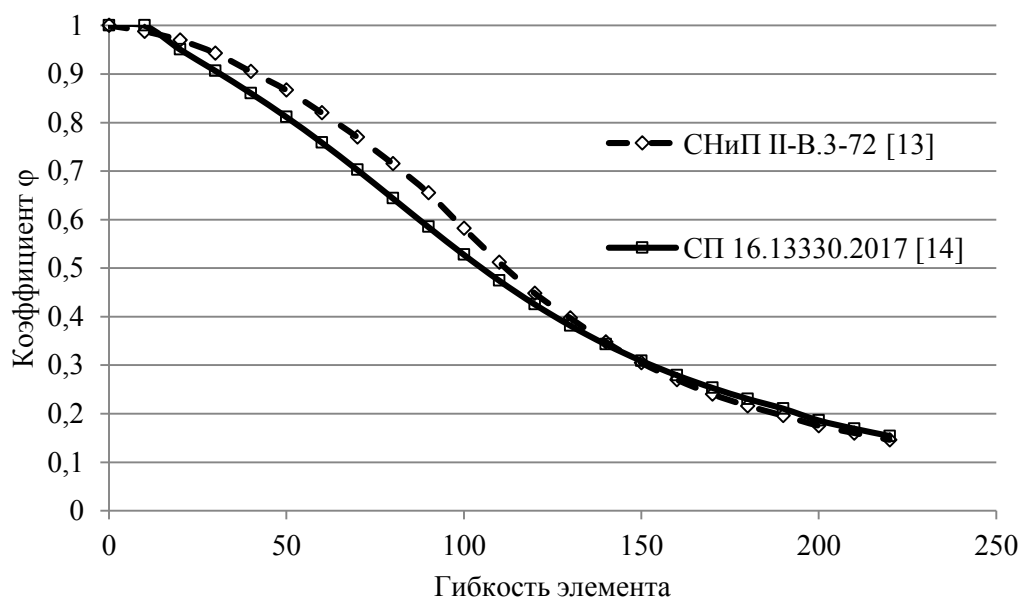


Рис. 2. Сравнение коэффициентов продольного изгиба φ в зависимости от гибкости элемента

одним болтом или через фасонку, независимо от вида соединения значение равно 0,75.

Результаты исследования

Далее представлены результаты расчета опор ЛЭП разного типа в металлическом исполнении по типовым проектам 50–70 гг. XX в.

Первая исследуемая опора спроектирована по типовому проекту Ленинградского отделения «Теплоэлектропроекта» (1961 г.) и Новосибирского отделения «Энергосетьпроекта» (1971 г.).

Конструктивная схема опоры – четырехгранная, башенного типа. Грани башни представляют собой плоские фермы, объединенные в единую пространственную систему горизонтальными диафрагмами. Фермы состоят из поясов и решетки. Схема решетки – ромбическая. Высота опоры – 150 м (повышенный уровень ответственности), расстояние между гранями в уровне опирания на фундаменты (отм. 0,000) – 25,0 м. Опирание поясов на фундаменты – жесткое. Неизменяемость сечения контура опоры обеспечена горизонтальными диафрагмами. Все элементы опоры (пояса, решетка, диафрагмы) выполнены из труб круглого сечения.

Размеры поперечного сечения элементов приняты следующими:

- пояса: 426×18, 377×14, 325×14, 299×11, 273×7, 219×6, 159×6;
- решетка: 351×9, 299×8, 273×7, 219×6, 180×6, 159×6, 133×6, 108×6;
- диафрагмы: 180×6, 159×6, 133×6.

Траверсы выполнены из пространственных ферм с раскосной решеткой: пояса – 133×6; раскосы – 108×6, 68×5.

Марка стали – С345. Протяженность пролета до следующей опоры составляет 1,985 км; перепад высот – 45 м. Для расчета приняты следующие данные: III ветровой район и III гололедный район.

Результаты расчета в ПК SCAD (рис. 3) показали, что в 31 элементе коэффициент использования сечения K_{\max} – отношение фактически вычисленного значения (несущей способности, предельной гибкости, местной устойчивости и т. д.) к предельно допустимому значению – больше единицы.

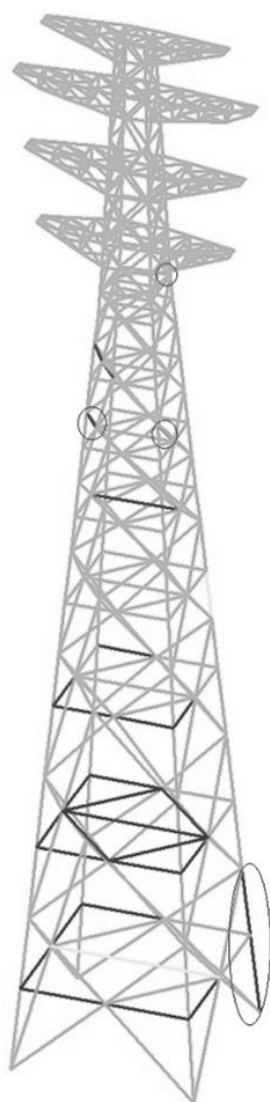
Анализ элементов, у которых коэффициент K_{\max} оказался более единицы, показал, что у восьми элементов не обеспечена прочность или устойчивость, у остальных элементов гибкость превышает предельные значения. Наиболее опасные зоны указаны на рис. 3 кругами.

Вторая исследуемая опора выполнена по типовой серии 3.407-155 «Унифицированные стальные конструкции промежуточных и анкерно-угловых стальных опор ВЛ 500 кВ для нормальных условий» по типу Р2+10 (промежуточная опора) общей высотой 43 м.

Опора является свободностоящей, башенной конструкции. Материал конструкций – сталь С255. Пояса опоры имеют переменное сечение из равнополочного уголка, увеличи-

вающееся сверху вниз по мере роста изгибающего момента (от L40×4 до L200×12).

Геометрическая неизменяемость опоры обеспечена раскосной крестовой решеткой ствола опоры и траверс, для обеспечения жесткости пространственной конструкции и равномерной работы граней опоры при действии крутящих моментов в опорах установлены диафрагмы. Общий вид опоры показан на рис. 4. Протяженность пролета до следующей опоры составляет 318,75 м.



Критический фактор K_{\max}				
<input checked="" type="checkbox"/>	0,11	0,99	847	
<input checked="" type="checkbox"/>	0,99	1,01	2	
<input checked="" type="checkbox"/>	1,01	1,51	31	

Рис. 3. Расчетная схема опоры с указанием критических факторов K_{\max}

Для расчета приняты следующие данные: III ветровой район и II гололедный район.

По результатам расчета несущая способность части элементов типовой опоры оказалась недостаточной. Были внесены изменения в конструкцию опоры и произведена замена 597 элементов. Общая масса элементов увеличилась на 12,3 % по сравнению с типовой схемой. При этом следует отметить, что у 105 элементов максимальное значение коэффициента K_{\max} связано с обеспечением предельной гибкости элемента.

Третья исследуемая опора выполнена по типовой серии 3.407-100 «Унифицированные стальные нормальные опоры ВЛ 220 и 330» по типу У220-2т+14 (анкерно-угловая опора) общей высотой 45,2 м. Общий вид опоры показан на рис. 5.

Опора является свободностоящей, башенной конструкции, с двумя подставками 5 и 9 м; выполнена из одиночных равнополочных уголков. Пояса опоры имеют переменное сечение, увеличивающееся сверху вниз по мере роста изгибающего момента (от L110×8 до L200×16).

Геометрическая неизменяемость опоры обеспечена раскосной крестовой решеткой ствола опоры, для обеспечения жесткости пространственной конструкции и равномерной работы граней опоры при действии крутящих моментов в опорах установлены диафрагмы жесткости. Материал конструкций – сталь С345. Протяженность пролета до следующей опоры составляет 108 м.

Для расчета приняты следующие данные: II ветровой район и III гололедный район.

По результатам расчета несущая способность части элементов типовой опоры оказалась недостаточной – была произведена замена 141 элемента, в том числе сечений поясов тросостойки. Общая масса элементов увеличилась на 14 % по сравнению с типовой схемой. При этом следует отметить, что у 80 элементов максимальное значение коэффициента K_{\max} связано с обеспечением предельной гибкости элемента.

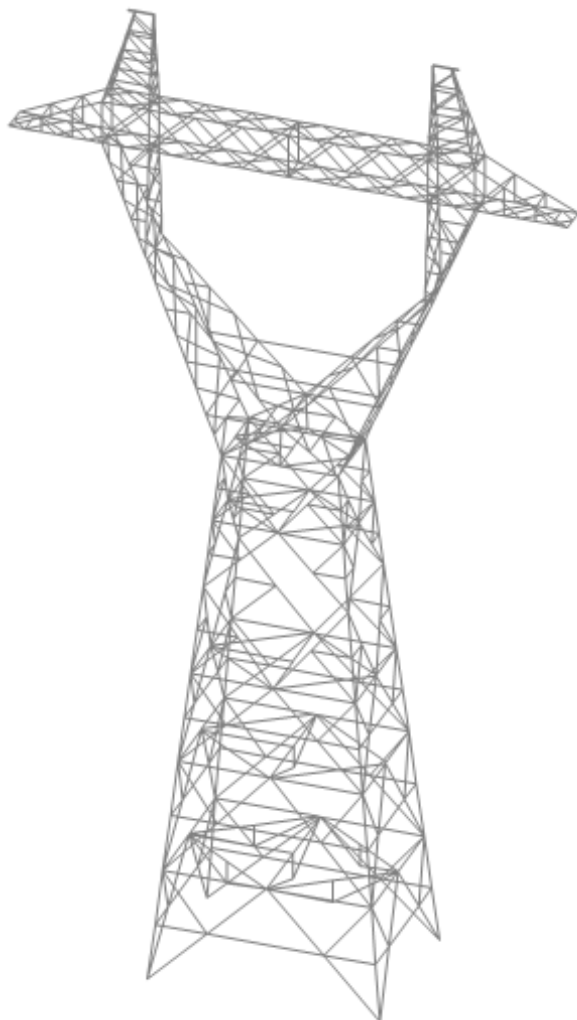


Рис. 4. Расчетная схема опоры типа P2+10

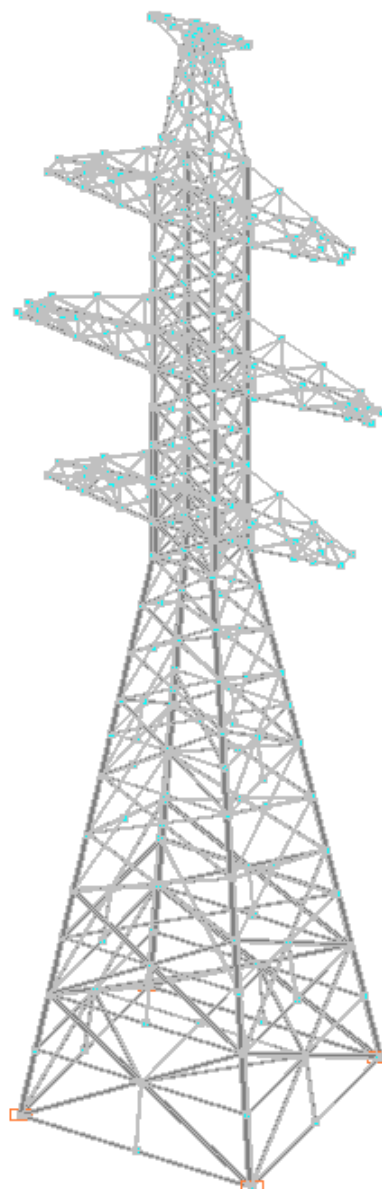


Рис. 5. Расчетная схема опоры типа Y220-2т+14

Выводы

По результатам проведенных расчетов и анализа нормативно-технической документации сделаны следующие выводы:

1. Типовые серии опор СССР не удовлетворяют требованиям надежности современных нормативно-технических документов, следовательно, использовать их для проектирования новых опор не рекомендуется.
2. Большинство элементов исследуемых опор показали неудовлетворительный коэф-

фициент K_{\max} , связанный с обеспечением предельной гибкости элемента.

3. Применяемые для опор сечения элементов из одиночных уголков имеют много недостатков, в частности для сжатых элементов решетки коэффициент условий работы γ_c в большинстве случаев равен 0,75, т. е. сечение элемента в полном объеме не используется. Таким образом, следует рассмотреть работу других видов сечений элементов ЛЭП для их надежной работы и обеспечения требований долговечности сооружения в целом.

Список источников

1. Шевченко Н. Ю. Повышение эффективности реконструируемых воздушных линий электропередач, подверженных экстремальным метеовоздействиям : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Саратов, 2011. 163 с.
2. Назим Я. В., Лещенко А. А., Костин В. В. Сравнительный анализ подходов к определению климатических нагрузок на ВЛ на примере Крымской ЭС // Металлические конструкции. 2010. Т. 16, № 1. С. 61–74.
3. Назим Я. В., Лещенко А. А., Костин В. В. Внедрение новых разработок нормативной документации в сфере климатического обеспечения электросетей в практические расчеты // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. 2009. Т. 1. С. 22–25.
4. Ветровые и гололедные воздействия на воздушные линии электропередачи / Е. В. Горохов, М. И. Казакевич, С. В. Турбин, Я. В. Назим ; под ред. Е. В. Горохова. Донецк, 2005. 348 с.
5. Прогнозирование и предупреждение аварий на воздушных линиях электропередачи при действии экстремальных гололедно-ветровых нагрузок / Е. В. Горохов, Я. В. Назим, В. Н. Васылев, А. А. Лещенко // Эффективность энергетического строительства и эксплуатации в Украине. Макеевка : Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, 2008. С. 54–65.
6. Ефимов Е. Н., Тимашова Л. В., Ясинская Н. В. Причины и характер повреждаемости компонентов воздушных линий электропередачи напряжением 110–50 кВ в 1997–2007 гг. // Энергия единой сети. 2012. № 5. С. 32–41.
7. Горохов Е. В., Шаповалов С. Н., Удод Е. И. Повышение надежности и долговечности электросетевых конструкций / под ред. Е. В. Горохова. Київ : Техніка, 1997. 284 с.
8. Аэродинамика электросетевых конструкций / Е. В. Горохов, М. И. Казакевич, С. Н. Шаповалов, Я. В. Назим ; под ред. Е. В. Горохова, М. И. Казакевича. Донецк, 2000. 336 с.
9. Барг И. Г., Эдельман В. И. Воздушные линии электропередачи: Вопросы эксплуатации и надежности. Москва : Энергоатомиздат, 1985. 248 с.
10. Горохов Е. В., Бакаев С. Н., Назим Я. В. Анализ причин и последствий аварий на участках ВЛ 330 кВ Джанкойских МЭС Крымской электроэнергетической системы НЭК «Укрэнерго» // Металлические конструкции. 2010. Т. 16, № 2. С. 81–97.
11. Правила устройства электроустановок : утверждены приказом Министерства энергетики Российской Федерации от 8 июля 2002 г. № 204 : дата введения 2003-01-01. 7-е издание. Москва : Минэнерго России, 2005. 504 с.
12. Правила устройства электроустановок / Государственный производственный комитет по энергетике и электрификации СССР, Техническое управление по эксплуатации энергосистем. 3-е издание, переработанное и дополненное. Москва ; Ленинград : Энергия, 1964. 456 с.
13. СНиП II-V.3-72. Стальные конструкции. Нормы проектирования : утверждены Государственным комитетом Совета Министров СССР по делам строительства 29 декабря 1972 г. Москва : Стройиздат, 1974. 70 с.
14. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции = Steel structures : свод правил : издание официальное : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 27 февраля 2017 г. № 126/пр : [взамен 16.13330.2011] : дата введения 2017-08-28. Москва : Стандартинформ, 2017. 142 с.

References

1. Shevchenko N. Yu. Improving the efficiency of reconstructed overhead power lines subject to extreme weather effects: specialty 05.09.03 Electrical complexes and systems: dissertation for the degree of candidate of Engineering. Saratov; 2011. 163 p. (In Russ.).
2. Nazim Ya. V., Leshchenko A. A., Kostin V. V. Comparative analysis of approaches to determining climatic loads on overhead lines on the example of the Crimean Power Plant. *Metal structures*. 2010;16(1):61–74. (In Russ.).
3. Nazim Ya. V., Leshchenko A. A., Kostin V. V. Implementation of new developments of normative documentation in the sphere of electric networks climatic provision in practical calculations. *Bulletin of the Donbas National Academy of Life and Architecture*. 2009;1:22–25. (In Russ.).
4. Gorokhov E. V., Kazakevich M. I., Turbin S. V., Nazim Ya. V. Wind and ice effects on overhead power lines. Edited by E. V. Gorohova. Donetsk; 2005. 348 p. (In Russ.).
5. Gorokhov E. V., Nazim Ya. V., Vasylev V. N., Leshchenko A. A. Forecasting and prevention of accidents on overhead power lines under the action of extreme ice-wind loads. *Efficiency of energy construction and*

operation in Ukraine. Makeevka: Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture; 2008. P. 54–65. (In Russ.).

6. Efimov E. N., Timashova L. V., Yasinskaya N. V. Causes and nature of damage to components of overhead power lines with a voltage of 110–750 kV in 1997–2007. *Energy of a single network*. 2012;(5):32–41. (In Russ.).

7. Gorokhov E. V., Shapovalov S. N., Udod E. I. Improving the reliability and durability of electric grid structures. Edited by E. V. Gorokhov. Kyiv: Tekhnika; 1997. 284 p. (In Russ.).

8. Gorokhov E. V., Kazakevich M. I., Shapovalov S. N., Nazim Ya. V. Aerodynamics of power grid structures. Edited by E. V. Gorokhov, M. I. Kazakevich. Donetsk; 2000. 336 p. (In Russ.).

9. Barg I. G., Edelman V. I. Overhead power lines: Issues of operation and reliability. Moscow: Energoatomizdat; 1985. 248 p. (In Russ.).

10. Gorokhov E. V., Bakaev S. N., Nazim Ya. V. Analysis of the causes and consequences of accidents at sections of the 330 kV overhead line Dzhankoy MES of the Crimean electric power system of NPC Ukrenergo. *Metal constructions*. 2010;16(2):81–97. (In Russ.).

11. Electric installation rules. Approved by order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated July 8, 2002 No. 204: introduction date 2003-01-01. 7th edition. Moscow: Ministry of Energy of Russia; 2005. 504 p. (In Russ.).

12. Rules for the installation of electrical installations / State Production Committee for Energy and Electrification of the USSR. Technical Administration for the Operation of Energy Systems. 3rd edition, revised and additional. Moscow; Leningrad: Energy; 1964. 456 p. (In Russ.).

13. SNiP II-B.3-72. Steel structures. Design standards: approved by the State Committee of the Council of Ministers of the USSR for construction on December 29, 1972. Moscow: Stroyizdat; 1974. 70 p. (In Russ.).

14. SP 16.13330.2017. Steel structures: set of rules: official edition: approved by order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated February 27, 2017 no. 126/pr: [instead of 16.13330.2011]: introduction date 2017-08-28. Moscow: Standartinform; 2017. 142 p. (In Russ.).

Информация об авторах

А. А. Новоселов – доцент кафедры «Здания, строительные конструкции и материалы» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

Н. С. Пичкурова – доцент кафедры «Здания, строительные конструкции и материалы» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

Information about the authors

A. A. Novoselov – Associate Professor of the Buildings, Building Constructions and Materials Department, Siberian Transport University, Candidate of Engineering.

N. S. Pichkurova – Associate Professor of the Buildings, Building Constructions and Materials Department, Siberian Transport University, Candidate of Engineering.

Статья поступила в редакцию 13.09.2022; одобрена после рецензирования 05.10.2022; принята к публикации 07.11.2022.

The article was submitted 13.09.2022; approved after reviewing 05.10.2022; accepted for publication 07.11.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья
УДК 625.123
doi 10.52170/1815-9265_2022_63_94

Влияние учета солнечной радиации на результаты теплотехнических расчетов земляного полотна железнодорожного пути

Александр Леонидович Исаков^{1✉}, Ирина Николаевна Гудкова²,
Бибишулу Соаткулевна Жураева³

^{1,2,3} Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

¹ mylab@ngs.ru✉

² goodkova@ngs.ru

³ bibisulu@mail.ru

Аннотация. Любое решение теплотехнической задачи, в частности при проектировании противопучинных мероприятий на транспортных магистралях, требует строгого задания температурных граничных условий на дневной поверхности. В случае железнодорожного пути это температура верхнего слоя балластной призмы. Априори она складывается из двух составляющих – температуры воздуха и так называемой температурной поправки, определяемой солнечной радиацией. В данной работе проведен анализ влияния температурной поправки на результаты теплотехнических расчетов, а именно глубины промерзания-оттаивания грунтов земляного полотна в холодных регионах. Приведено описание натурных экспериментов по количественной оценке влияния солнечной радиации на изменение температурного режима поверхности балластной призмы. Описана методика определения температурной поправки, зависящей от таких основных факторов, как широта местности, температура воздуха, степень облачности и число альбедо. Разработана компьютерная программа, реализующая приведенную методику. Выполненное сравнение расчетных и экспериментальных данных температурной поправки позволило сделать вывод о корректности приведенной методики для выполнения практических расчетов температурной поправки на солнечную радиацию при определении температурного режима поверхности балластной призмы применительно к теплотехническим расчетам земляного полотна железнодорожного пути. Установлена степень влияния таких исходных параметров методики расчета, как число альбедо и показатель облачности, на величину температурной поправки в различных климатических зонах. Выявлена чувствительность результатов расчета глубин промерзания-оттаивания земляного полотна к возможной ошибке в задании температурной поправки, определяющей верхнее граничное условие теплотехнической задачи. Показана особая роль учета температурной поправки при теплотехнических расчетах в криолитозоне.

Ключевые слова: солнечная радиация, земляное полотно, сезонное промерзание-оттаивание земляного полотна, криолитозона, промерзание и оттаивание грунтов

Для цитирования: Исаков А. Л., Гудкова И. Н., Жураева Б. С. Влияние учета солнечной радиации на результаты теплотехнических расчетов земляного полотна железнодорожного пути // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 4 (63). С. 94–105. DOI 10.52170/1815-9265_2022_63_94.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Influence of accounting for solar radiation on the results of thermal engineering calculations of the railway track subgrade

Alexander L. Isakov^{1✉}, Irina N. Gudkova², Bibisulu S. Zhuraeva³

^{1,2,3} Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

¹ mylab@ngs.ru✉

² goodkova@ngs.ru

³ bibisulu@mail.ru

Abstract. Any solution of a heat engineering problem, in particular, when designing anti-heaving measures on transport lines, requires a strict specification of temperature boundary conditions on the daylight surface. In the case of a railway track, this is the temperature of the upper layer of the ballast prism. A priori, it consists of two

components – air temperature and the so-called temperature correction determined by solar radiation. In this paper, an analysis of the influence of temperature correction on the results of thermal engineering calculations is carried out – the depth of freezing and thawing of subgrade soils in cold regions. The description of full-scale experiments on the quantitative assessment of the influence of solar radiation on changes in the temperature regime of the surface of the ballast prism is given. A method is described for determining the temperature correction, which depends on such main factors as the latitude of the area, air temperature, the cloudiness index, and Albedo of the ballast. A computer program has been developed that implements the above method. The performed comparison of the calculated and experimental data of the temperature correction made it possible to conclude that the above methodology is correct for performing practical calculations of the temperature correction for solar radiation when determining the temperature regime of the surface of the ballast prism in relation to thermal engineering calculations of the subgrade of the railway track. The degree of influence of such initial parameters of the calculation method as Albedo of the ballast and the cloudiness index on the value of the temperature correction in various climatic zones is established. The “sensitivity” of the results of calculating the depths of freezing and thawing of the subgrade to a possible error in setting the temperature correction, which determines the upper boundary condition of the heat engineering problem, is revealed. The special role of taking into account the temperature correction in thermal engineering calculations in permafrost is shown.

Keywords: solar radiation, subgrade, seasonal freezing-thawing of a subgrade, cryolithic zone, freezing and thawing of soils

For citation: Isakov A. L., Gudkova I. N., Zhuraeva B. S. Influence of accounting for solar radiation on the results of thermal engineering calculations of the railway track subgrade. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(63):94–105. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_63_94.

Введение

Строительство, реконструкция и модернизация железных дорог в холодных регионах во многом зависят от грамотного проектирования противопучинных мероприятий, в основе которых лежат теплотехнические расчеты земляного полотна. В свою очередь, корректное решение задачи о промерзании-оттаивании земляного полотна предполагает достоверность задания первого граничного условия – температуры на дневной поверхности. Для этого необходим правильный учет теплового баланса на поверхности балластной призмы железнодорожного пути, в основе которого лежит солнечная радиация. Результатом учета теплового баланса является так называемая температурная поправка ΔT , которая после добавления к температуре воздуха $T_{\text{воз}}$ и будет определять верхнее граничное условие теплотехнической задачи о промерзании-оттаивании земляного полотна – температуру поверхности балластной призмы:

$$T_{\text{бал}} = T_{\text{воз}} + \Delta T. \quad (1)$$

О важности учета температурной поправки в теплофизических расчетах было отмечено ранее, например в [1–4]. При этом было показано, что наибольшее влияние температурная поправка оказывает на результаты расчетов в криолитозоне, где основным процессом является оттаивание грунтов земляного полотна, которое происходит в месяцы с наибольшими значениями температурной поправки.

Поскольку температурная поправка ΔT , в отличие от температуры воздуха, является расчетным параметром, то о ней важно знать следующее:

- какие природные факторы и в какой степени оказывают на нее влияние;
- какое влияние сама температурная поправка оказывает на расчетную глубину промерзания-оттаивания земляного полотна.

Ответы на поставленные вопросы невозможны без обоснованного выбора методики расчета температурной поправки, подкрепленной сравнением полученных результатов расчета с экспериментальными данными.

Эксперимент

Эксперименты по определению температурной поправки проводились в июле-августе 2019 г. в Новосибирске на учебном полигоне Сибирского государственного университета путей сообщения в постановке, описанной ниже.

На полигоне были выделены два участка, моделирующие балластную призму из путевого щебня толщиной 0,5 м (рис. 1), один из которых был закрыт солнцезащитным экраном (навесом). Оба участка были оборудованы температурными датчиками, непрерывно фиксирующими температуру поверхности балластного слоя в течение суток. Третий датчик, расположенный рядом на высоте 1,5 м от поверхности в тени, фиксировал температуру воздуха. На рис. 2 показан суточный

фрагмент многодневной осциллограммы температур, фиксируемых датчиками на поверхности балласта и в воздухе при минимальной облачности ($n = 0,2$).

По приведенному на рис. 2 фрагменту осциллограммы была выполнена оценка среднесуточных значений температуры воздуха и поверхности балластной призмы на обоих участках (с учетом и без учета солнечной радиации). Для этого каждый из графиков аппроксимировался синусоидой, как это показано на рис. 3. Вычисление средних значений температуры выполнялось по следующей схеме:

$$S_{\text{день}} = (T_{\text{max}} - T_0) \int_{t_0}^{t_1} \sin\left(\frac{t - t_0}{t_1 - t_0} \pi\right) dt = (T_{\text{max}} - T_0) \frac{2(t_1 - t_0)}{\pi}; \quad (2)$$

$$S_{\text{ночь}} = (T_{\text{min}} - T_0) \int_{t_1}^{t_2} \sin\left(\frac{t - t_1}{t_2 - t_1} \pi\right) dt = (T_{\text{min}} - T_0) \frac{2(t_2 - t_1)}{\pi};$$

$$T_{\text{сут}} = \frac{1}{t_2 - t_0} (S_{\text{день}} + S_{\text{ночь}}) + T_0, \quad (3)$$

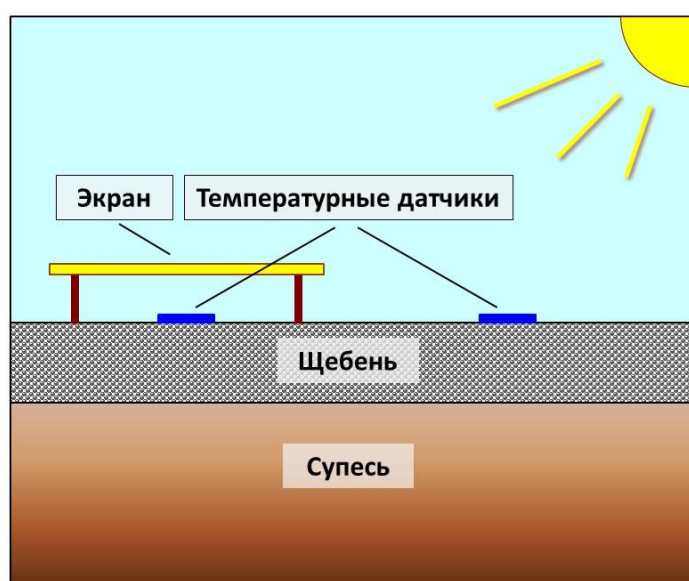


Рис. 1. Схема эксперимента

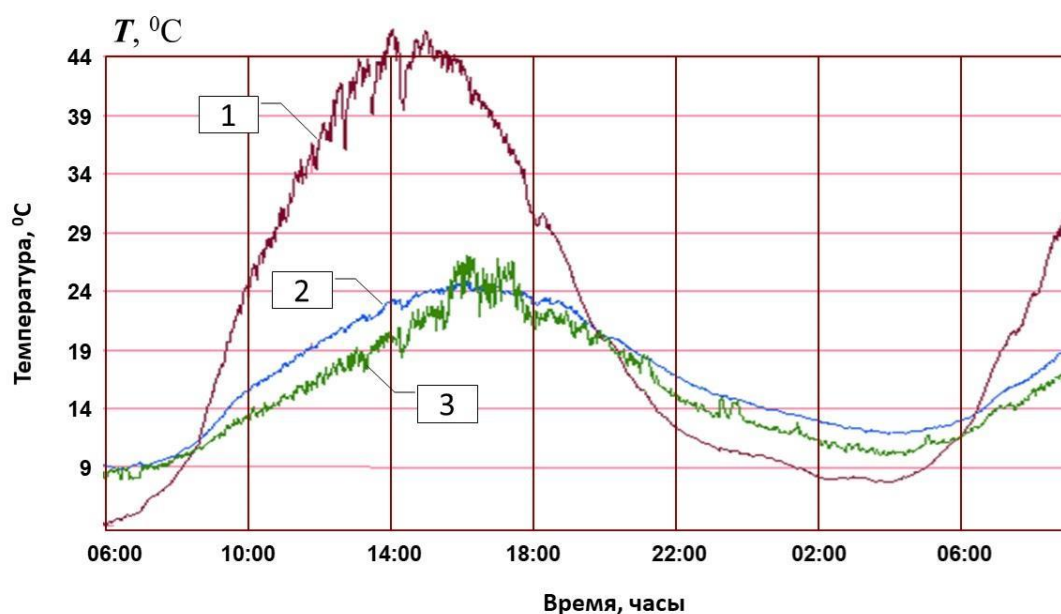


Рис. 2. Осциллограммы суточного изменения температуры 24.07.2019:
1 — поверхности балласта; 2 — поверхности балласта под навесом; 3 — воздуха

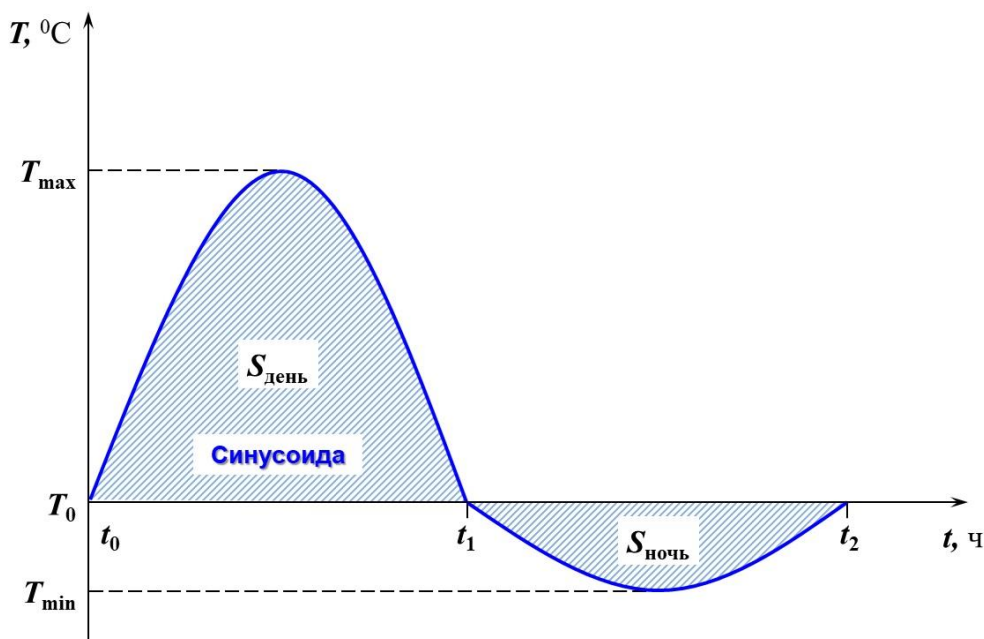


Рис. 3. Схема к расчету среднесуточной температуры по осциллограмме

где $S_{\text{день}}$ — площадь под температурной синусоидой, соответствующей дневному времени суток; $S_{\text{ночь}}$ — площадь под температурной синусоидой, соответствующей ночному времени суток; $T_{\text{сут}}$ — среднесуточное значение температуры.

Среднесуточные значения температуры, рассчитанные по графикам рис. 2, дали следующие результаты: среднесуточная температура воздуха $T_{\text{воз}} = 15,8^\circ\text{C}$, среднесуточная температура на балласте $T_{\text{бал}} = 23,4^\circ\text{C}$, среднесуточная температура на балласте под навесом $T_{\text{бал}}^{\text{нав}} = 18,4^\circ\text{C}$. Таким образом, экспериментально полученное среднесуточное значение температурной поправки для балласта без защитного экрана оказалось равным:

$$\Delta T = T_{\text{бал}} - T_{\text{воз}} = 23,4 - 15,8 = 7,6^\circ\text{C}. \quad (4)$$

Это максимальное среднесуточное значение температурной поправки за период проведения эксперимента — с 20 июля по 8 августа 2019 г. Усредненное значение температурной поправки за весь период оказалось равным $4,4^\circ\text{C}$. Далее оба эти значения будут сопоставлены с соответствующими значениями, рассчитанными по нижеописанной методике.

Методика расчета температурной поправки

В основе любой методики расчета температурной поправки лежит уравнение теплового баланса [4–7]

$$R = P + LE + B, \quad (5)$$

где R — так называемый радиационный баланс, $\text{Вт}/\text{м}^2$; P — плотность теплового потока воздуха, возникающего в результате конвективного теплообмена на границе с дневной поверхностью, $\text{Вт}/\text{м}^2$; LE — затраты тепла на испарение и конденсацию влаги на дневной поверхности, $\text{Вт}/\text{м}^2$; B — поток тепла от земной поверхности вглубь почвы и обратно, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Поскольку в нашем случае дневной поверхностью является верх балластной призмы, то составляющей уравнения (5), отвечающей за испарение и конденсацию влаги (LE), можно пренебречь. Что касается баланса встречных потоков тепла на верхней поверхности путевого балласта (B), то в суточном цикле он близок к нулю, следовательно, его также можно не учитывать в уравнении (5).

Выражение для радиационного баланса записывается в следующем виде [4–7]:

$$R = Q(1 - A) - E_{\text{эф}}, \quad (6)$$

где Q — суммарная радиация, сумма прямой и рассеянной солнечной радиации, $\text{Вт}/\text{м}^2$; A — альбедо, доля отраженной от поверхности солнечной радиации; $E_{\text{эф}}$ — эффективное излучение, разность между земным излучением и противозлучением атмосферы, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Второй ненулевой член уравнения (5) — плотность теплового потока (P), представляющего собой турбулентный теплообмен между дневной поверхностью и приповерхностным

слоем воздуха, – связан с температурной поправкой законом Ньютона – Рихмана:

$$P = \alpha \Delta T, \quad (7)$$

где α – эмпирический коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² · град).

Таким образом, следуя (5), с учетом выше оговоренных допущений ($LE = 0$ и $B = 0$), для априорного определения температурной поправки ΔT достаточно приравнять правые части равенств (6) и (7)

$$\Delta T = \frac{Q(1 - A) - E_{\text{эф}}}{\alpha}. \quad (8)$$

Суммарная радиация Q может быть определена с помощью эмпирической зависимости [8], учитывающей степень облачности n :

$$Q = Q_0(1 - an - bn^2), \quad (9)$$

где Q_0 – значение суммарной радиации при безоблачном небе, Вт/м² [8–10]; n – среднее месячное количество общей облачности; a – коэффициент, зависящий от широты (табл. 1) [10]; b – условный коэффициент, равный 0,38 [10].

Эффективное излучение $E_{\text{эф}}$, представляющее собой потерю тепла с дневной поверхности в ночное время, есть функция степени облачности n , которая может быть учтена с помощью эмпирической зависимости [10]

$$E_{\text{эф}} = E_0(1 - cn), \quad (10)$$

где E_0 – эффективное излучение при безоблачном небе, Вт/м², зависящее от значений средних месячных температур и парциального давления водяного пара [10] (табл. 2); c – коэффициент, характеризующий влияние облачности в зависимости от широты [10] (табл. 3).

Таблица 1

Значения коэффициента a в зависимости от географической широты

φ	85	80	75	70	65	60	55	50	45
a	0,14	0,15	0,16	0,18	0,27	0,36	0,38	0,40	0,39

Таблица 2

Эффективное излучение при безоблачном небе E_0 , МДж/(м²·мес)

$T_{\text{воз}},$ °C	Парциальное давление водяного пара, ГПа														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20
–20	197	197													
–18	201	201													
–16	205	205													
–14	214	214													
–12	218	218													
–10	226	210													
–8	230	218													
–6	235	222	210												
–4	243	230	218												
–2	256	235	226	210											
0	260	243	230	218											
2	272	251	235	222	214										
4	277	256	243	230	218	205									
6	285	268	251	235	226	214	205								
8	293	272	256	243	230	218	210	201							
10	302	281	264	251	239	226	218	205	197						
12	310	289	272	256	243	235	222	214	205	193					
14	318	297	281	264	251	239	230	218	210	192	184				
16	327	306	289	272	256	347	235	226	218	205	189	172			
18		314	293	281	268	256	243	230	222	214	193	176	159		
20		323	306	289	272	260	251	239	226	218	201	180	163	151	
22			314	297	281	268	256	243	235	226	205	189	172	155	138
24			323	308	289	277	264	251	243	230	210	193	176	159	142
26			327	310	297	281	272	256	247	235	218	197	180	163	147
28				318	306	289	281	264	251	243	222	201	184	168	151

Таблица 3

Значения коэффициента c в зависимости от географической широты

φ	85	80	75	70	65	60	55	50	45
c	0,85	0,84	0,82	0,80	0,78	0,76	0,74	0,72	0,70

В качестве альтернативного варианта оценки эффективного излучения $E_{\text{эф}}$ можно также воспользоваться алгоритмом, описанным в [11] и реализованным в компьютерной программе [12].

Коэффициент теплоотдачи α есть функция от скорости обдувания воздухом дневной поверхности. В практических расчетах, где среднемесячная скорость обдувания балластной призмы находится в пределах 3–5 м/с, значение α можно принимать равным 23 Вт/(м² · град).

Для реализации вышеописанного алгоритма определения температурной поправки была разработана специальная программа «Delta-T», главный экран которой приведен на рис. 4.

На рис. 5 изображена гистограмма результатов расчета значений температурной поправки по месяцам для климатических условий Новосибирска.

В табл. 4 приведены сравнительные результаты расчетных и экспериментальных данных температурной поправки для двух

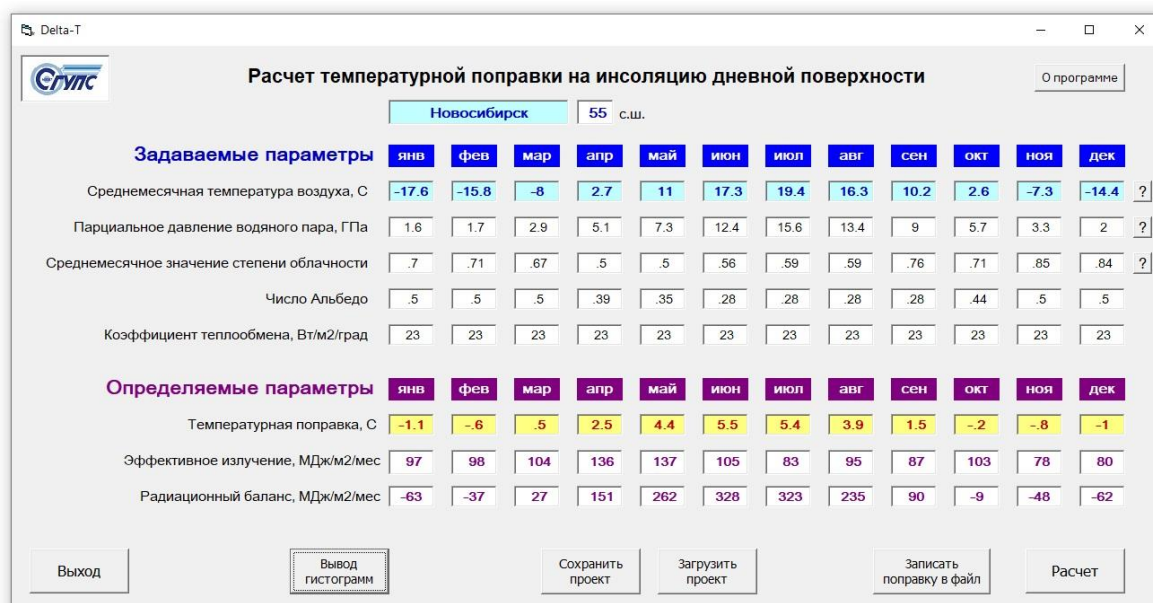


Рис. 4. Результаты расчета температурной поправки для климатических условий Новосибирска в программе «Delta-T»

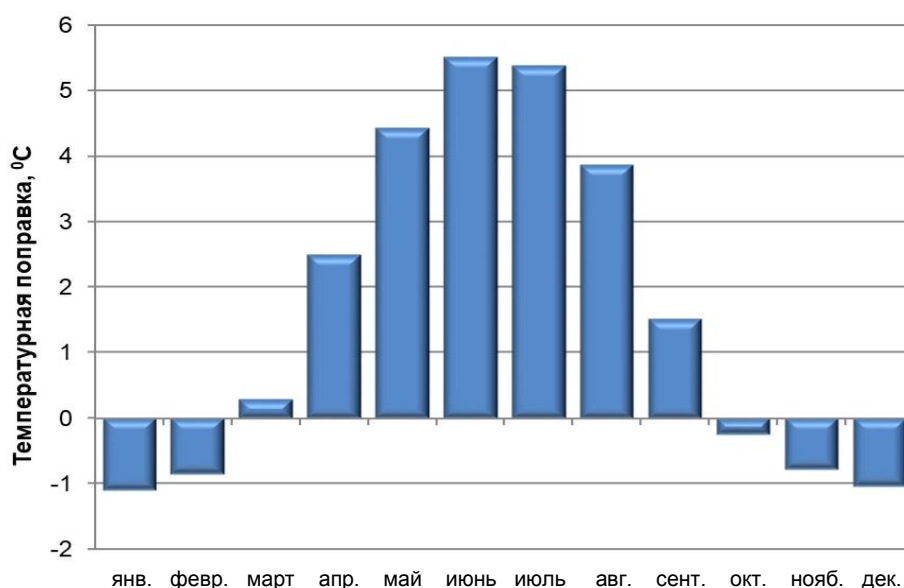


Рис. 5. Среднемесячные значения температурной поправки для климатических условий Новосибирска

Таблица 4

Значения температурной поправки

Дата/период	Температурная поправка ΔT , °C		Расхождение, %
	экспериментальное значение	расчетное значение	
24.07.2019	7,6	7,6	6,7
20.07.2019–08.08.2019	4,4	4,6	–4,5

случаев: среднесуточных значений за 24 июля 2019 г. и усредненных значений за период с 20 июля по 8 августа 2019 г.

Из табл. 4 видно, что расхождение расчетных и экспериментальных значений температурной поправки не превосходит 10 %, что положительно характеризует вышеописанный алгоритм расчета.

Как следует из описания вышеприведенной методики, основными параметрами, оказывающими влияние на результаты расчета

температурной поправки, являются альбедо отражающей поверхности и степень облачности. На рис. 6 показаны результаты расчетов температурной поправки при вариации указанных параметров в пределах 30 % относительно базовых. В качестве базовых параметров были взяты июльские значения альбедо ($A = 0,25$) и степени облачности ($n = 0,6$) для климатических условий Новосибирска, где среднее значение температурной поправки ΔT для июля равно 5,4 °C.

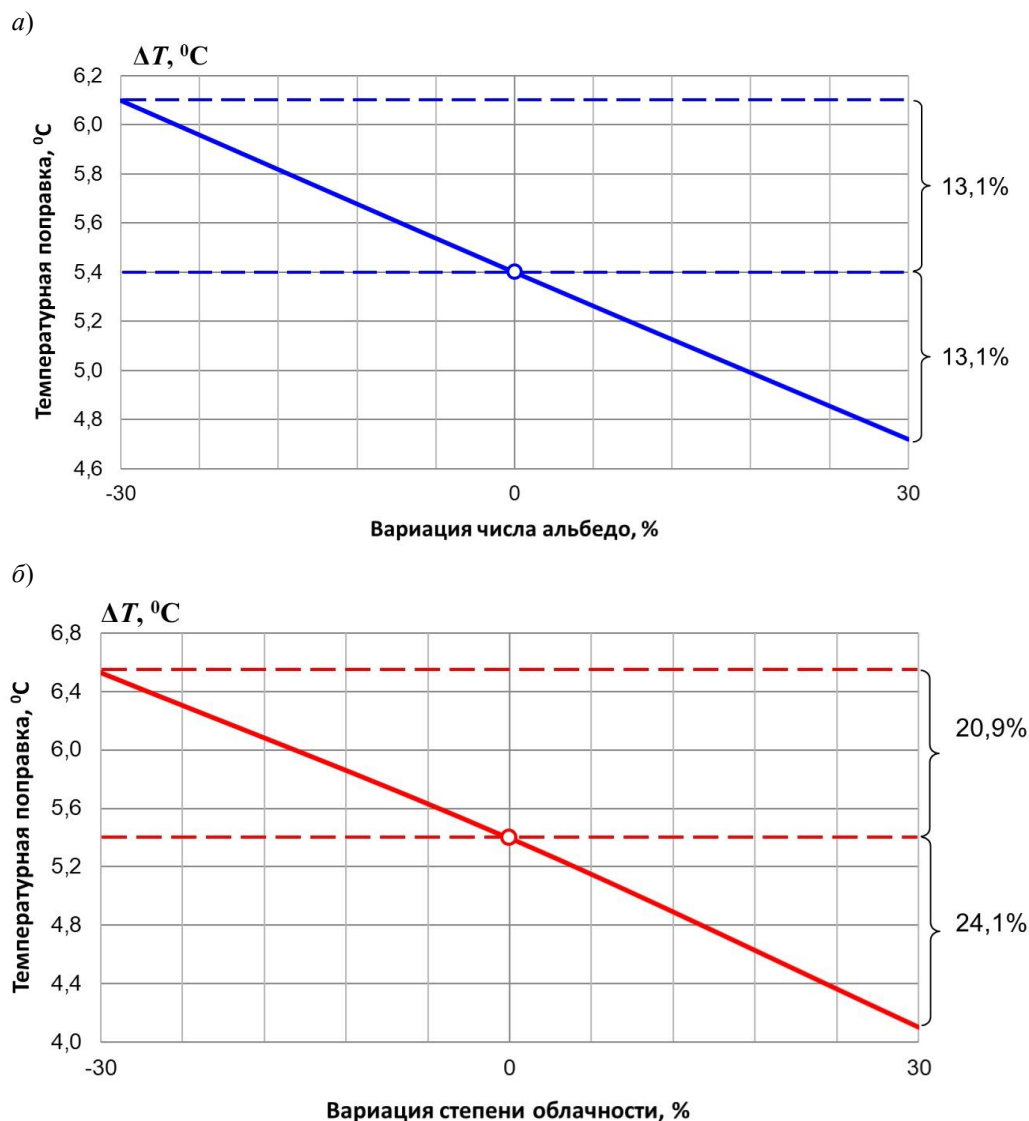


Рис. 6. Влияние вариации числа альбедо (а) и степени облачности (б) на результаты расчета температурной поправки ΔT

Из рис. 6 видно, что максимальная ошибка в 30 % при задании альбедо приводит к ошибке в расчете температурной поправки не более чем на 13 %, а при задании степени облачности – не более чем на 24 %.

Таким образом, выполненный анализ и проведенные сравнения с экспериментальными данными позволяют считать вышеописанную методику расчета температурной поправки на солнечную радиацию пригодной для практических расчетов.

Анализ влияния температурной поправки на глубину промерзания и оттаивания земляного полотна

Для определения степени влияния температурной поправки на глубину промерзания и оттаивания земляного полотна была проведена серия численных экспериментов с использованием одномерной теплофизической модели промерзания-оттаивания земляного полотна, реализованной в программном комплексе «Freeze-1» [13, 14]. Во всех нижеприведенных расчетах принималась следующая модель железнодорожного пути: балластная призма – 0,45 м щебня и 0,2 м песка; земляное полотно – легкий суглинок с числом пластичности 8, весовой влажностью 0,2 и коэффициентом пористости 0,6.

На рис. 7 показан годовой ход температуры воздуха в Новосибирске с учетом температурной поправки на солнечную радиацию (см. рис. 5) в формате ввода данных в программном комплексе «Freeze-1».

На рис. 8 показаны расчетные графики промерзания-оттаивания земляного полотна в годовом цикле для климатических условий Новосибирска. На графике $H_{\text{фаз}}$ – глубина промерзания земляного полотна ниже основной площадки, определяемая по критерию $T = T_{\text{фаз}}$, где $T_{\text{фаз}}$ – температура фазовых переходов, при которой вся поровая вода переходит в мерзлое состояние.

Взяв за точку отсчета глубину промерзания ($H_{\text{фаз}} = 1,28$ м), соответствующую расчетным значениям температурных поправок, приведенным на рис. 5 и 7, отметим, насколько чувствительна величина $H_{\text{фаз}}$ к вариации температурной поправки ΔT .

Как показывает график на рис. 9, вариация расчетных значений температурной поправки в пределах 30 % приводит к очень незначительному ($\pm 3,1$ %) изменению расчетной глубины промерзания $H_{\text{фаз}}$, соответствующей климатическим условиям Новосибирска. Здесь нулевому значению на оси абсцисс соответствует глубина промерзания земляного полотна под основной площадкой, равная 1,28 м (см. рис. 8).

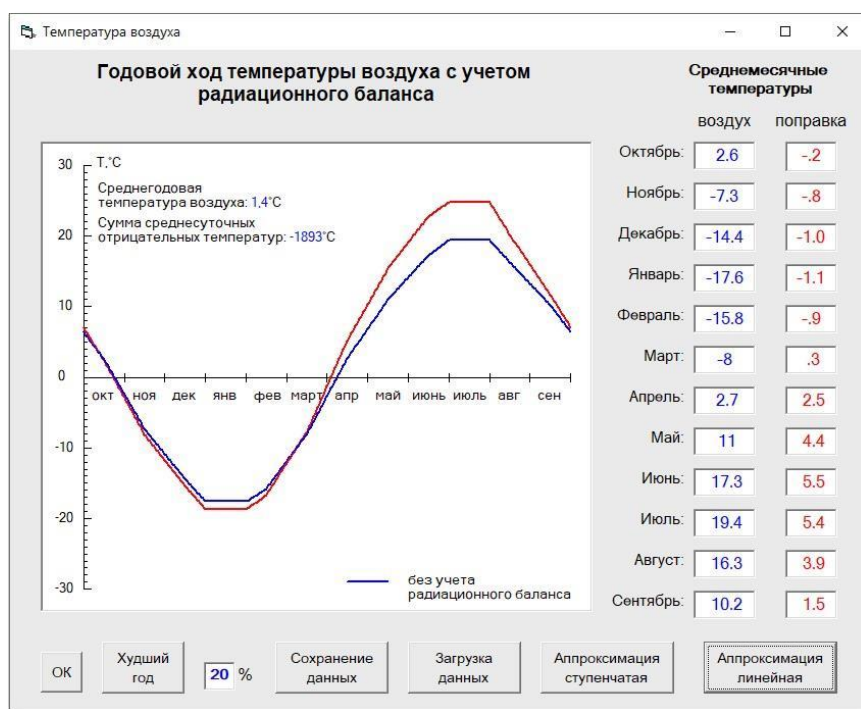


Рис. 7. Годовой ход температуры воздуха в Новосибирске с учетом температурной поправки

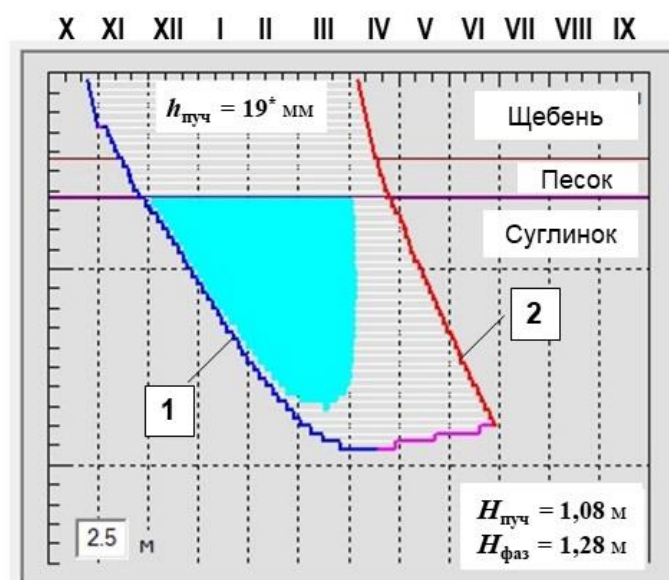


Рис. 8. Годовой цикл промерзания (1) и оттаивания (2) земляного полотна в Новосибирске

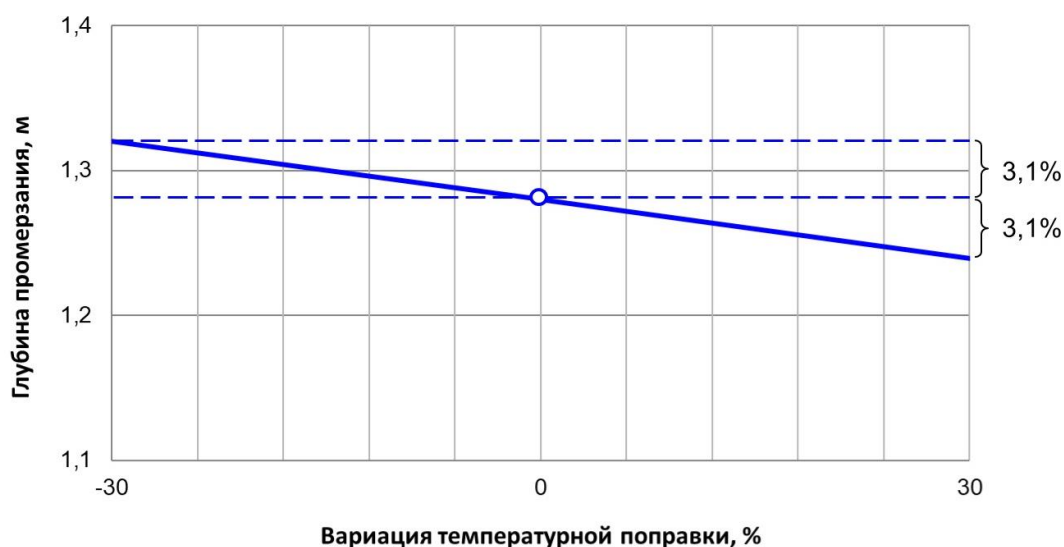


Рис. 9. Изменение расчетной глубины промерзания земляного полотна в Новосибирске при вариации температурной поправки в пределах 30 %

Прежде чем привести результаты аналогичного анализа для условий криолитозоны, надо отметить, что первичным в этом случае является оттаивание грунтов земляного полотна. Поэтому за начальный месяц при проведении теплотехнических расчетов принимается апрель (рис. 10 и 11), а в качестве точки отсчета для сравнительного анализа взята глубина оттаивания ($H_{от} = 1,88$ м, см. рис. 11).

Как следует из графика на рис. 12, глубина оттаивания в условиях криолитозоны почти в два раза чувствительнее к вариации температурной поправки по сравнению с климатической зоной сезоннопромерзающих грунтов (см. рис. 9). Нулевому значению на оси абс-

цисс на графике (рис. 12) соответствует глубина оттаивания, равная 1,88 м (см. рис. 11).

Совместный анализ графиков на рис. 6, 9 и 12 позволяет сделать заключение, что ошибка в задании альбедо на 30 % при определении температурной поправки приведет к ошибке в оценке глубины промерзания земляного полотна не более чем на 1–1,5 % в сезоннопромерзающих грунтах и не более чем на 2–3 % в криолитозоне. А при ошибке задания степени облачности на 30 % расчетная глубина промерзания земляного полотна будет различаться не более чем на 2 % в сезоннопромерзающих грунтах и не более чем на 2,5–3,5 % в криолитозоне.

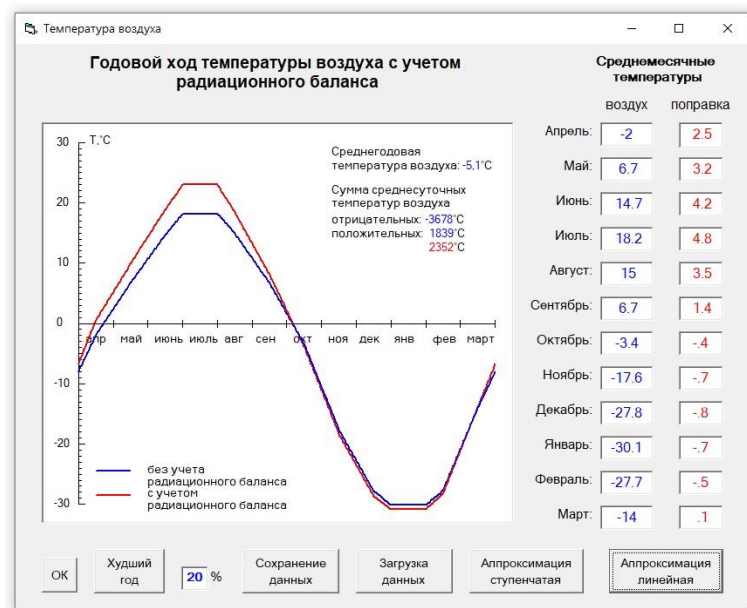


Рис. 10. Годовой ход температуры воздуха в Бодайбо с учетом температурной поправки

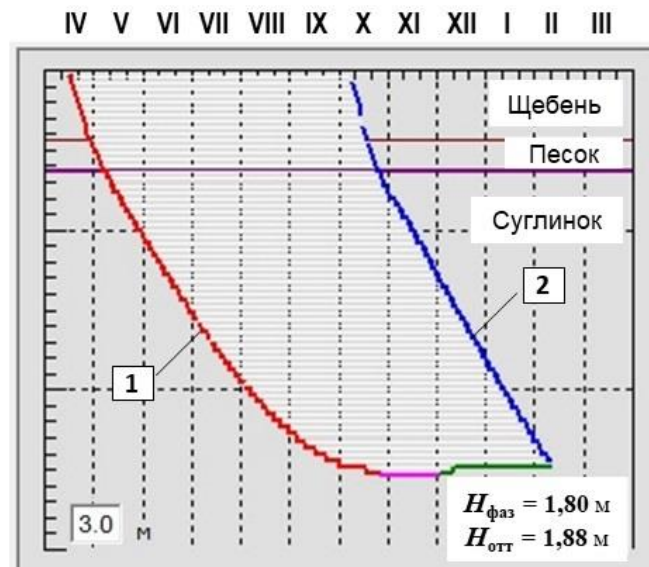


Рис. 11. Годовой цикл оттаивания (1) и промерзания (2) земляного полотна в Бодайбо

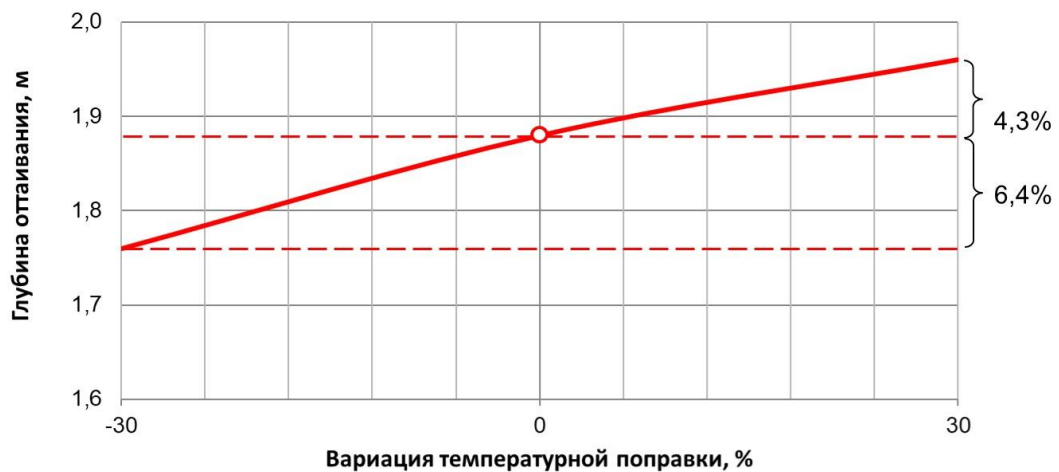


Рис. 12. Изменение расчетной глубины оттаивания земляного полотна в Бодайбо при вариации температурной поправки в пределах 30 %

Выводы

1. Проведенные на полигоне СГУПС натурные эксперименты по определению влияния солнечной радиации на температурный режим поверхности балластной призмы позволили оценить корректность использования комбинированной методики расчета так называемой температурной поправки для верхнего граничного условия задачи о промерзании-оттаивании земляного полотна.

2. Анализ влияния вариации основных исходных параметров на величину температурной поправки показал, что изменение альбедо дневной поверхности (путевого балласта) на 30 % приводит к изменению температурной

поправки не более чем на 13 %, а такое же изменение показателя облачности может привести к изменению температурной поправки на 24 %.

3. На примере анализа результатов расчета глубин промерзания-оттаивания в сезонно-промерзающих и сезоннооттаивающих грунтах земляного полотна железнодорожного пути показано влияние на них ошибки в учете солнечной радиации. Так, максимальная ошибка в задании температурной поправки на солнечную радиацию для граничного условия теплотехнической задачи на 30 % даст погрешность в определении глубины оттаивания грунта под основной площадкой земляного полотна в криолитозоне на 6–7 %.

Список источников

1. Isakov A. L. Dangerous deformations of subgrade and methods of their calculation // *Sciences in Cold and Arid Regions*. 2013. Vol. 5, no. 4. P. 353–362.
2. Isakov A. L., Lavrova A. Yu. Accounting for the solar radiation in thermal regime prediction for railway subgrade in cold regions // *Sciences in Cold and Arid Regions*. 2015. Vol. 7, no. 4. P. 293–299.
3. Исаков А. Л., Лаврова А. Ю. Солнечная радиация и температурный режим земляного полотна // *Путь и путевое хозяйство*. 2016. № 3. С. 15–19.
4. Основы геокриологии. Ч. 1. Физико-химические основы геокриологии / под редакцией Э. Д. Ершова. Москва : Издательство Московского государственного университета, 1995. 368 с.
5. Национальный атлас России : в 4 т. Т. 2. Природа и экология / Министерство транспорта РФ, Федеральное агентство геодезии и картографии. Москва : Роскартография, 2008. 495 с.
6. Кондратьев В. Г. Стабилизация земляного полотна на вечномерзлых грунтах. Чита : ПолиграфРесурс, 2011. 177 с.
7. Будыко М. И. Тепловой баланс земной поверхности. Ленинград : Гидрометеиздат, 1956. 255 с.
8. Будыко М. И. Избранные работы. Санкт-Петербург : Америкит : Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова, 2020. 206 с.
9. СП 131.13330.2020. Строительная климатология: актуализированная редакция СНиП 23-01-99 : утвержден приказом Минстроя России № 859 от 24 декабря 2020 г. Москва, 2020. 150 с.
10. Атлас теплового баланса земного шара / под редакцией М. И. Будыко. Москва : Межведомственный геофизический комитет, 1963. 69 с.
11. Цой А. П., Грановский А. С., Бараненко А. В. Моделирование и математическая программа для расчета величины эффективного излучения // *Вестник Международной академии холода*. 2014. № 1. С. 7–10.
12. Программа расчета эффективного излучения / ТОО «Тениз». URL: http://maxteniz.kz/iak_in_rk/article_iac/ercalc/ (дата обращения: 27.05.2022).
13. Исаков А. Л., Ким Хюн Чол. Теплофизическая дискретная модель промерзания грунта земляного полотна // *Транспорт Урала*. 2012. Вып. 2 (33). С. 121–124.
14. Методика назначения противопучинных мероприятий и выбора их параметров на железных и автомобильных дорогах на базе программного комплекса «Freeze-1» / Сибирский государственный университет путей сообщения. URL: <http://freeze-1.stu.ru/index.htm> (дата обращения: 27.05.2022).

References

1. Isakov A. L. Dangerous deformations of subgrade and methods of their calculation. *Sciences in Cold and Arid Regions*. 2013;5(4):353–362.
2. Isakov A. L., Lavrova A. Yu. Accounting for the solar radiation in thermal regime prediction for railway subgrade in cold regions. *Sciences in Cold and Arid Regions*. 2015;7(4):293–299.

3. Isakov A. L., Lavrova A. Yu. Solar radiation and the temperature regime of the roadbed. *Railway Track and Facilities*. 2016;(3):15–19. (In Russ.).
4. Fundamentals of geocryology. Part 1. Physico-chemical fundamentals of geocryology. Edited by E. D. Ershov. Moscow: Lomonosov Moscow State University Publishing House; 1995. 368 p. (In Russ.).
5. National Atlas of Russia: in 4 vols. Vol. 2. Nature and Ecology. Ministry of Transport of the Russian Federation, Federal Agency for Geodesy and Mapping topography. Moscow: Roskartografiya; 2008. 495 p. (In Russ.).
6. Kondratiev V. G. Stabilization of the roadbed on permafrost soils. Chita: PoligrafResurs; 2011. 175 p. (In Russ.).
7. Budyko M. I. Thermal balance of the Earth's surface. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1956. 220 p. (In Russ.).
8. Budyko M. I. Selected Works. St. Petersburg: Amerit: Main Geophysical Observatory named after A. I. Voeikov; 2020. 206 p. (In Russ.).
9. SP 131.13330.2020. Construction climatology: updated version of SNiP 23-01-99: approved by Order of the Ministry of Construction of Russia No. 859 dated December 24, 2020. Moscow; 2020. 150 p. (In Russ.).
10. Atlas of the thermal balance of the globe. Edited by M. I. Budyko. Moscow: Interdepartmental Geophysical Committee; 1963. 69 p. (In Russ.).
11. Tsoi A. P., Granovsky A. S., Baranenko A. V. Modeling and mathematical program for calculating the value of effective radiation. *Bulletin of the International Academy of Cold*. 2014;(1):7–10. (In Russ.).
12. Program for calculating the effective radiation flux. Teniz LLP. (In Russ.). URL: http://maxteniz.kz/iak_in_rk/article_iac/ercalc/.
13. Isakov A. L., Kim Hyun Chol. Thermo physical discrete model of roadbed ground freezing. *Transport of the Urals*. 2012;(33):121–124. (In Russ.).
14. Methodology for the appointment of anti-heaving measures and the choice of their parameters on railways and roads based on the Freeze-1 software package. Siberian Transport University. (In Russ.). URL: <http://freeze-1.stu.ru/index.htm>.

Информация об авторах

А. Л. Исаков – заведующий кафедрой «Изыскания, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог» Сибирского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук, профессор.

И. Н. Гудкова – доцент кафедры «Изыскания, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат экономических наук.

Б. С. Жураева – аспирант кафедры «Изыскания, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

A. L. Isakov – Professor of the Survey, Design and Construction of Railways and Highways Department, Siberian Transport University, Doctor of Engineering.

I. N. Gudkova – Associate Professor of the Survey, Design and Construction of Railways and Highways Department, Siberian Transport University, Candidate of Economic Sciences.

B. S. Zhuraeva – Postgraduate Student of the Survey, Design and Construction of Railways and Highways Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 28.06.2022; одобрена после рецензирования 10.10.2022; принята к публикации 11.10.2022.

The article was submitted 28.06.2022; approved after reviewing 10.10.2022; accepted for publication 11.10.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 625.7/.8

doi 10.52170/1815-9265_2022_63_106

Мониторинг несущей способности основной площадки земляного полотна автомобильных дорог в зоне расположения водопропускных труб

Валерий Степанович Воробьев^{1✉}, Елена Леонидовна Карелина²,
Ирина Борисовна Репина³

^{1,2,3} Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

¹ decansgd@stu.ru✉

² karelinaelena23@mail.ru

³ sgd@stu.ru

Аннотация. В рамках реализации национального государственного проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги» актуальной проблемой является содержание автомобильных дорог федерального, регионального, межмуниципального и местного значения, включающее мониторинг автомобильных дорог. Актуальной задачей мониторинга является увеличение межремонтных периодов и сокращение затрат на обследование автомобильных дорог. В статье обращено внимание на участки автомобильных дорог, находящиеся непосредственно в зоне расположения водопропускных труб, и рассмотрен мониторинг несущей способности основной площадки земляного полотна автомобильных дорог в зоне расположения водопропускных труб.

Предложен показатель оценки несущей способности земляного полотна автомобильных дорог в зоне расположения водопропускных труб, рассчитываемый на основе значений плотности, коэффициента сцепления и угла внутреннего трения, полученных в результате исследования грунтов земляного полотна по инженерно-геологическим элементам. Получены теоретические значения несущей способности земляного полотна автомобильных дорог в зоне расположения водопропускных труб по критериям минимальной погрешности параметров уравнений регрессии, из которых выражены плотность грунта, удельное сопротивление и угол внутреннего трения по максимальному значению коэффициента детерминации. Путем исследования грунта установлены границы изменения влажности в барьерных местах водопропускных труб, на некотором удалении от них, а также коэффициент пористости, плотность; выделены инженерно-геологические элементы. Проверка сходимости экспериментальных и теоретических значений выполнена для экспоненциальной, логарифмической, степенной и прямолинейной зависимостей. Рассчитана абсолютная погрешность. Наименьшая из приведенных относится к прямолинейной и логарифмической зависимостям. Обосновано, что несущая способность земляного полотна автомобильных дорог в зонах расположения водопропускных труб может быть определена по расчетным значениям удельного сцепления, угла внутреннего трения, статически связанных с экспериментально определяемым модулем деформации, или по экспериментально установленному удельному сцеплению, расчетным значениям угла внутреннего трения и модулю деформации.

Предложенная методика оценки несущей способности земляного полотна значительно снижает затраты на экспериментальные исследования грунтов и позволяет прогнозировать сроки проведения капитального ремонта.

Ключевые слова: автомобильная дорога, мониторинг, водопропускные трубы, земляное полотно, физико-механические характеристики грунтов

Для цитирования: Воробьев В. С., Карелина Е. Л., Репина И. Б. Мониторинг несущей способности основной площадки земляного полотна автомобильных дорог в зоне расположения водопропускных труб // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 4 (63). С. 106–113. DOI 10.52170/1815-9265_2022_63_106.

Monitoring of the roadbed main site bearing capacity in the area of culverts

Valery S. Vorobyev^{1✉}, Elena L. Karelina², Irina B. Repina³

^{1,2,3} Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

¹ decansgd@stu.ru✉

² karelinaelena23@mail.ru

³ sgd@stu.ru

Abstract. As part of the implementation of the national state project Safe and Quality Roads, maintenance of federal, regional, inter-municipal and local roads that includes road monitoring, is an urgent issue. An urgent task of monitoring is to increase the periods between repairs and to reduce the cost of road inspections. The article pays attention to the road sections directly located in the culvert location area and has considered the main road bearing capacity monitoring subgrade site in the culvert location area.

The notion of the main roadbed area was introduced that is identical to the accepted top layer of the embankment. The bearing capacity estimation index of the road bed in the area of culverts location is introduced. The estimation index is calculated on the base of density values, coefficient of adhesion and internal friction, received as an investigation result of road bed grounds according to engineering and geological elements. Theoretical values of road bed bearing capacity in the area of culverts location according to the criterion of minimum error of parameters of regression equations, from which the ground density, specific resistance and the angle of internal friction according to the maximum value of determination coefficient have been obtained. Ground investigations established the boundaries of humidity change at the barrier culvert locations, at some distance from the culverts, porosity coefficient, and density and highlighted the engineering geological elements. Verification of experimental and theoretical values convergence was carried out for exponential, logarithmic, power and straight-line dependences. The absolute error is calculated. The smallest one is for the linear and logarithmic dependences. It has been grounded that the bearing capacity of a road bed in the culvert location areas can be determined according to the calculated values of the specific coupling, the angle of internal friction statically connected with the experimentally determined deformation modulus or according to the experimentally determined specific coupling and the calculated values of the internal friction angle and the deformation modulus.

The proposed method of the earth bed bearing capacity evaluation considerably reduces the costs of experimental investigations of soils and allows predicting the terms of major repairs.

Key words: road, monitoring, culverts, roadbed, physical-mechanical characteristics of soils

For citation: Vorobyev V. S., Karelina E. L., Repina I. B. Monitoring of the roadbed main site bearing capacity in the area of culverts. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(63):106–113. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_63_106.

Введение

Перевозки грузов автомобильным транспортом играют важную роль в развитии регионов России. С каждым годом возрастают темпы строительства новых и реконструкции действующих автомобильных дорог.

Автомобильная дорога предназначена для обеспечения безопасного движения автотранспорта с заданными нагрузками и скоростями. Назначение автомобильной дороги определяет ее потребительские свойства, оказывающие непосредственное влияние на эффективность и безопасность работы автомобильного транспорта [1–3].

Национальным проектом «Безопасные и качественные автомобильные дороги» [4] предусматривается повышение качества содержания и увеличение протяженности отремонтированных дорог, соответствующих международным

стандартам качества. Реализация данного проекта в установленные сроки возможна при наличии научно обоснованных программ мониторинга автомобильных дорог.

Мониторинг состояния автомобильных дорог до настоящего времени осуществляется при осенне-летних и зимних осмотрах, что не позволяет получать количественные характеристики, на значение которых существенное влияние оказывают параметры физико-механических характеристик земляного полотна. Получение данных характеристик грунтов позволяет прогнозировать состояние автомобильных дорог, особенно в зонах расположения водопропускных труб, что сократит значительные материально-технические и экономические ресурсы для проведения натурных и лабораторных исследований.

Существенное влияние на несущую способность грунта оказывает водно-тепловой режим

земляного полотна согласно исследованиям Н. А. Пузакова [5], В. М. Сиденко [6], А. Я. Тулаева [7], Н. Я. Хархуты [8]. Изменение водно-теплового режима земляного полотна вызывает в грунтах сложные физико-химические процессы, влияющие на условия работы дорожных одежд и сокращающие срок их службы.

Разработкой методов исследования и математического моделирования эксплуатации автомобильных дорог занимались В. С. Воробьев [9–11], О. А. Бендер [12], Д. А. Донгак [13], А. И. Ярмолинский [14], G. Morel, M. Okamura [15], T. Schanz [16], H. Seed, F. Tosti [17] и др.

Одной из важнейших автомобильных дорог Новосибирской области является автомобильная дорога регионального значения К-17р Новосибирск – Кочки – Павлодар, обеспечивающая межгосударственное сообщение с Казахстаном, Узбекистаном, Киргизией и Таджикистаном.

Цель исследования – определить величину несущей способности земляного полотна автомобильных дорог в зонах расположения водопропускных труб и сопоставить ее с величиной, полученной теоретическим путем.

Материалы и методы исследования

Исследования несущей способности основной площадки земляного полотна были проведены на 20, 44, 72, 156, 171, 180, 182, 201, 205, 226, 228, 289, 303, 327, 334-м км автодороги К-17р.

В геотехнической лаборатории в соответствии с ГОСТ 5180–2015 [18] и ГОСТ 12248.1–2020 [19] получены физико-механические характеристики грунтов земляного полотна.

На основании выполненных исследований введен показатель оценки несущей способности земляного полотна автомобильных дорог в зонах расположения водопропускных труб. Для расчета несущей способности $P_{кр}$ принята формула, применяемая на железных дорогах. Несущая способность $P_{кр}$ принята равной суммарному напряжению σ от транспортной нагрузки и веса дорожной одежды:

$$P_{кр} = \sigma. \quad (1)$$

Напряжения в земляном полотне σ определяются от расчетной нагрузки автомобиля.

Расчет несущей способности $P_{кр}$ земляного полотна автомобильных дорог в зоне расположения водопропускных труб выполнен по формуле

$$P_{кр} = \left[\frac{\pi(C \operatorname{ctg} \varphi + 0,1\rho h)}{\operatorname{ctg} \varphi + \varphi - \pi/2} + 0,1\rho h \right] \cdot 100, \quad (2)$$

где C – коэффициент сцепления; φ – угол внутреннего трения; ρ – плотность; h – толщина верхнего слоя насыпи.

Эти значения получены в результате исследований грунтов земляного полотна по всем инженерно-геологическим элементам в зоне водопропускных труб.

Для получения теоретических значений несущей способности основной площадки земляного полотна (верхнего слоя насыпи) автомобильных дорог в зоне расположения водопропускных труб по критериям минимальной погрешности и минимальной девиации параметров используем уравнения регрессии, полученные при обработке статистических данных испытаний грунтов для модуля деформации E , из которых выражены плотность грунта ρ , удельное сцепление C и угол внутреннего трения φ по максимальному значению коэффициента детерминации.

Для прямолинейной зависимости модуль деформации E равен:

$$E = a\rho - b, \quad (3)$$

где a, b – коэффициенты.

Плотность грунта

$$\rho = \frac{E + b}{a}. \quad (4)$$

Для степенной зависимости

$$E = s\rho^k, \quad (5)$$

где s – коэффициент; k – показатель степени.

Тогда

$$\rho = \sqrt[k]{\frac{E}{s}}. \quad (6)$$

Для логарифмической зависимости

$$E = a \ln \rho - e, \quad (7)$$

отсюда

$$\rho = \frac{e(E + e)}{a}. \quad (8)$$

Для экспоненциальной зависимости

$$E = ae^{m\rho}, \quad (9)$$

отсюда

$$\rho = \frac{\ln E}{m \ln a}. \quad (10)$$

Угол внутреннего трения φ выразим из другой группы уравнений регрессии.

Для прямолинейной зависимости

$$E = a\varphi - b, \quad (11)$$

отсюда

$$\varphi = \frac{E + b}{a}. \quad (12)$$

Для степенной зависимости

$$E = s\varphi^k, \quad (13)$$

отсюда

$$\varphi = \sqrt[k]{k \frac{E}{s}}. \quad (14)$$

Для логарифмической зависимости

$$E = a \ln \varphi - e, \quad (15)$$

отсюда

$$\varphi = \frac{e(E + e)}{a}. \quad (16)$$

Для экспоненциальной зависимости

$$E = ae^{m\varphi}, \quad (17)$$

отсюда

$$\varphi = \frac{\ln E}{\ln a}. \quad (18)$$

Удельное сцепление C выражено из третьей группы уравнений регрессии.

Для прямолинейной зависимости

$$E = aC - b, \quad (19)$$

отсюда

$$C = \frac{E + b}{a}. \quad (20)$$

Для степенной зависимости

$$E = sC^k, \quad (21)$$

отсюда

$$C = \sqrt[k]{k \frac{E}{s}}. \quad (22)$$

Для логарифмической зависимости

$$E = a \ln C - e, \quad (23)$$

отсюда

$$C = \frac{e(E + e)}{a}. \quad (24)$$

Для экспоненциальной зависимости

$$E = ae^{mC}, \quad (25)$$

$$C = \frac{\ln E}{m \ln a}. \quad (26)$$

Результаты исследования

По результатам исследования грунта выявлено, что земляное полотно отсыпано суглинком легким твердым, с прослоями полутвердого и супесью твердой, с примесью органических веществ 5–6 %. Влажность грунтов в барьерных местах водопропускных

труб колеблется в интервале 0,04...0,32; на некотором удалении от водопропускных труб – 0,05...0,26. Коэффициент пористости в барьерных местах водопропускных труб в пределах 0,585...0,938; на некотором удалении от водопропускных труб – 0,582...0,788. Плотность грунтов земляного полотна в барьерных местах водопропускных труб составляет 1,70...1,97 г/см³ на участках, удаленных от водопропускной трубы, и 1,72...1,99 г/см³ на участках вблизи водопропускной трубы. В целом исследуемые грунты неоднородные, с переслоением супесей и суглинков твердых, пластичных и тугопластичных консистенций.

Выделены инженерно-геологические элементы (ИГЭ), сгруппированные по идентичным характеристикам грунта: ИГЭ-1п, ИГЭ-1с, ИГЭ-1р, ИГЭ-2п, ИГЭ-2с, ИГЭ-2р.

На основе полученных физико-механических характеристик произведен расчет несущей способности основной площадки земляного полотна в зонах расположения водопропускных труб для каждого ИГЭ.

Результаты расчета несущей способности земляного полотна в зонах расположения водопропускных труб для ИГЭ-1п на 20, 72 и 156-м км автодороги К-17р приведены в таблице.

Проверку сходимости экспериментальных и теоретических значений выполним следующим образом:

1. Для ИГЭ-1п на 72-м км автодороги К-17р получим следующие зависимости для плотности грунта ρ :

1) экспоненциальная зависимость:

$$y = 0,0708e^{2,4585x};$$

2) логарифмическая зависимость:

$$y = 26,043 \ln x - 9,2286;$$

3) степенная зависимость:

$$y = 0,4237x^{4,4915};$$

4) прямолинейная зависимость:

$$y = 14,297x - 19,678, \text{ где } y = E; x = \rho.$$

2. Рассчитаем плотность грунта ρ :

1) для экспоненциальной зависимости:

$$E = 0,0708e^{2,4585\rho}; \rho = 0,32 \text{ г/см}^3;$$

2) для логарифмической зависимости:

$$E = 26,043 \ln \rho - 9,2286; \rho = 1,92 \text{ г/см}^3;$$

3) для степенной зависимости:

$$E = 0,4237\rho^{4,4915}; \rho = 17,46 \text{ г/см}^3;$$

4) для прямолинейной зависимости:

$$E = 14,297\rho - 19,678; \rho = 1,71 \text{ г/см}^3.$$

Результаты расчета несущей способности $P_{кр}$ земляного полотна в зонах расположения водопропускных труб для ИГЭ-1п на 72-м км автодороги К-17р

Наименование выработки	H , м	ρ , г/см ³	ctg φ	φ , град	C , кПа	$P_{кр}$, кПа
Шурф № 1	0,1	1,94	1,732	29,5	20	369
	0,7	1,94	1,804	29,3	19	379
Шурф № 2	0,1	1,92	1,881	28,4	18	372
	0,7	1,89	1,881	28,0	18	390
Шурф № 3	0,1	1,90	1,804	29,4	19	365
	0,7	1,89	1,804	29,1	19	382
	1,2	1,85	1,804	29,0	18	373
Шурф № 4	0,1	1,90	1,732	30,5	19	339
	0,7	1,86	1,732	30,1	18	338
	1,2	1,85	1,732	29,9	17	332
	1,7	1,84	1,804	28,8	24	503

Примечание. H – глубина отбора проб.

3. Сравним расчетные значения ρ_p с экспериментальными ρ_ε и вычислим абсолютную погрешность по формуле

$$\Delta\rho = \rho_p - \rho_\varepsilon. \quad (27)$$

Получим:

1) для экспоненциальной зависимости:

$$\Delta\rho = 2,257;$$

2) для логарифмической зависимости:

$$\Delta\rho = 0,024;$$

3) для степенной зависимости:

$$\Delta\rho = 15,646;$$

4) для прямолинейной зависимости:

$$\Delta\rho = 0,048.$$

4. Относительную погрешность вычислим по формуле

$$\gamma_{отн} = (\Delta\rho / \rho_\varepsilon) \cdot 100 \%. \quad (28)$$

Имеем:

1) для экспоненциальной зависимости:

$$\gamma_{отн} = 116 \%;$$

2) для логарифмической зависимости:

$$\gamma_{отн} = 1 \%;$$

3) для степенной зависимости:

$$\gamma_{отн} = 864 \%;$$

4) для прямолинейной зависимости:

$$\gamma_{отн} = 3 \%.$$

Наименьшая погрешность получается по прямолинейному и логарифмическому закону.

5. Аналогично вычисляем угол внутреннего трения φ :

1) для экспоненциальной зависимости:

$$E = 1,0604e^{0,0628\varphi}; \varphi = 561,19 \text{ град};$$

2) для логарифмической зависимости:

$$E = 9,6747 \ln \varphi - 25,89; \varphi = 32,20 \text{ град};$$

3) для степенной зависимости:

$$E = 0,0218\varphi^{1,6964}; \varphi = 29,07 \text{ град};$$

4) для прямолинейной зависимости:

$$E = 0,3595\varphi - 3,783; \varphi = 23,88 \text{ град}.$$

6. Сравним с экспериментальными значениями φ и вычислим абсолютную погрешность:

1) для экспоненциальной зависимости:

$$\Delta\rho = 529,693;$$

2) для логарифмической зависимости:

$$\Delta\rho = 0,899;$$

3) для степенной зависимости:

$$\Delta\rho = 1,466;$$

4) для прямолинейной зависимости:

$$\Delta\rho = 0,376.$$

7. Получим относительную погрешность:

1) для экспоненциальной зависимости:

$$\gamma_{отн} = 1\,682 \%;$$

2) для логарифмической зависимости:

$$\gamma_{отн} = 3 \%;$$

3) для степенной зависимости:

$$\gamma_{отн} = 5 \%;$$

4) для прямолинейной зависимости:

$$\gamma_{отн} = 2 \%.$$

Наименьшая погрешность получается по прямолинейному и логарифмическому закону.

8. Подставив полученные значения в формулу (1), выразим прогнозируемую несущую способность основной площадки земляного полотна:

1) для логарифмической зависимости:

$$P_{\text{кр.пр}} = 329 \text{ кПа};$$

2) для прямолинейной зависимости:

$$P_{\text{кр.пр}} = 381 \text{ кПа}.$$

9. Абсолютную погрешность определим как

$$\Delta P_{\text{кр}} = P_{\text{кр.пр}} - P_{\text{кр.э.}} \quad (29)$$

Получим:

1) для логарифмической зависимости:

$$\Delta P_{\text{кр.пр}} = 39;$$

2) для прямолинейной зависимости:

$$\Delta P_{\text{кр.пр}} = 1.$$

10. Относительная погрешность составит

$$\gamma_{\text{отн}} = (\Delta P_{\text{кр.пр}} / P_{\text{кр.э.}}) \cdot 100 \%. \quad (30)$$

Получим:

1) для логарифмической зависимости:

$$\gamma_{\text{отн}} = 10,7 \%;$$

2) для прямолинейной зависимости:

$$\gamma_{\text{отн}} = 0,3 \%.$$

Выводы

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы. Теоретическими исследованиями установлено, что абсолютная погрешность при расчетах несущей способности земляного полотна $P_{\text{кр}}$ автомобильных дорог в зонах расположения водопропускных труб составляет 1,000...58,000, а относительная – 0,3...17 % в 4 % случаев. В остальных 96 % случаев относительная погрешность при расчетах несущей способности земляного полотна $P_{\text{кр}}$ автомобильных дорог в

зонах расположения водопропускных труб составила более 20 %.

При расчетах плотности грунта ρ в 112 случаях абсолютная погрешность составила 0,084...0,251, а относительная погрешность – 0...13 %, а в 104 случаях абсолютная погрешность составила 1,720...81,940, а относительная – более 20 %.

При расчетах угла внутреннего трения φ в 126 случаях абсолютная погрешность составила 0,083...2,883, а относительная – 0...10 %, а в 114 случаях абсолютная погрешность составила 2,494...26 440,125, а относительная – более 20 %.

При расчетах удельного сцепления C в 10 случаях абсолютная погрешность составила 0,000...0,002, а относительная – 0...8 %, а в 98 случаях абсолютная погрешность составила 0,004...814,906, а относительная – более 20 %.

Таким образом, несущая способность земляного полотна автомобильных дорог в зонах расположения водопропускных труб может быть определена по расчетным значениям удельного сцепления C_p , угла внутреннего трения φ_p , статически связанным с модулем деформации E_p , определяемым экспериментально для заданного ИГЭ, или по экспериментально установленному удельному сцеплению C_p и расчетным значениям угла внутреннего трения φ_p и модуля деформации E_p , причем наиболее точным является расчет по логарифмической и прямолинейной зависимостям.

Список источников

1. СП 34.13330.2021. Автомобильные дороги : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 9 февраля 2021 г. № 53/пр : введен в действие с 10 августа 2021 г. Москва : Стандартинформ, 2021. 128 с.
2. Гатиятуллин М. Х., Исмагилов А. И. Эффективные методы содержания автомобильных дорог // Техника и технология транспорта. 2017. № 2 (3). С. 8.
3. Лазарев Ю. Г., Симонов Д. Л., Новик А. Н. Формирование потребительских и эксплуатационных свойств автомобильных дорог // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2016. № 1 (35). С. 43–47.
4. Национальный проект «Безопасные и качественные автомобильные дороги» : утвержден президиумом Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам (протокол от 24 декабря 2018 г. № 15) / разработан Минтранс России во исполнение Указа Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 года № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» // Росавтодор : федеральное дорожное агентство : [сайт]. URL: <https://bkdrf.ru/> (дата обращения: 25.09.2022).
5. Водно-тепловой режим земляного полотна и дорожных одежд / под редакцией И. А. Золотаря, Н. А. Пузакова, В. М. Сиденко. Москва : Транспорт, 1971. 416 с.
6. Сиденко В. М. Расчет и регулирование водно-теплого режима дорожных одежд и земляного полотна. Москва : Автотрансиздат, 1962. 116 с.

7. Строительство автомобильных дорог : [учебник для вузов специальности «Автомобильные дороги»] / Н. Н. Иванов, Н. А. Пузаков, А. Я. Тулаев, Е. П. Андрулионис. Москва : Транспорт, 1969. 2 т.
8. Хархута Н. Я., Васильев Ю. М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. Москва : Транспорт, 1975. 288 с.
9. Концепция повышения эффективности содержания и реконструкции инженерных сооружений автомобильных дорог / В. С. Воробьев, О. А. Бендер, Е. Л. Карелина, К. В. Катыльмова // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2018. № 2 (45). С. 11–18.
10. Воробьев В. С., Бендер О. А. Оценка надежности дорожных одежд автомобильных дорог по результатам диагностики // Политранспортные системы : материалы IX Международной научно-технической конференции. Новосибирск : Издательство Сибирского государственного университета путей сообщения, 2017. С. 172–176.
11. Статистические модели физико-механических характеристик грунтов автомобильных дорог в зоне расположения водопропускных труб / В. С. Воробьев, Е. Л. Карелина, О. А. Бендер, К. В. Катыльмова // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2018. Т. 15, № 4 (62). С. 560–573.
12. Бендер О. А., Верескун В. Д., Воробьев В. С. Агентная модель прогнозирования рисков в системе контроля качества ремонта автомобильных дорог // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2013. № 1 (49). С. 103–108.
13. Донгак Д. А. Совершенствование мероприятий по повышению эксплуатационной надежности водопропускных труб на автомобильных дорогах Республики Тыва : специальность 05.23.11 «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Донгак Джамиль Айыр-Санаевич. Санкт-Петербург, 2007. 159 с.
14. Герасимова Е. О., Ярмолинский А. И., Светенко В. С. Учет природно-климатических условий при устройстве водопропускных труб в процессе реконструкции автомобильной дороги (на примере участка автомобильной дороги «Раздольное – Хасан» км 49 – км 60) // Новые идеи нового века : материалы Международной научной конференции ФАД ТОГУ. 2018. Т. 3. С. 317–322.
15. Okamura M., Ishihara M., Tamura K. Liquefied soil pressures on vertical walls with adjacent embankments // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2006. № 26. P. 265–274.
16. Schanz T. Experimental Unsaturated Soil Mechanics. Berlin, 2007. 494 p. (Springer Proceedings in Physics ; vol. 112).
17. GPR analysis of clayey soil behaviour in unsaturated conditions for pavement engineering and geoscience applications / F. Tosti, A. Benedetto, L. B. Ciampoli [et al.] // Near surface geophysics. 2016. № 14. P. 127–144.
18. ГОСТ 5180–2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик : дата введения 2016-04-01 / разработан ОАО «Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве». Москва : Стандартинформ, 2016. 19 с.
19. ГОСТ 12248.1–2020. Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного : дата введения 2021-06-01 / разработан НИИОСП им. Н. М. Герсеева – АО «НИЦ «Строительство». Москва : Стандартинформ, 2020. 14 с.

References

1. SP 34.13330.2021. Highways: approved by order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated February 9, 2021 No. 53/pr: entered into force on August 10, 2021. Moscow: Standartinform; 2021. 128 p. (In Russ.).
2. Gatiyatullin, M. Kh., Ismagilov A. I. Effective methods of highways maintenance. *Technique and technology of transport*. 2017;2(3):8. (In Russ.).
3. Lazarev Yu. G., Simonov D. L., Novik A. N. Formation of consumer and operational properties of highways. *Technical and technological problems of service*. 2016;1(35):43–47. (In Russ.).
4. The National Project Safe and High-quality Highways. Approved by the Presidium of the Presidential Council for Strategic Development and National Projects (Protocol No. 15 of December 24, 2018). Developed by the Ministry of Transport of Russia pursuant to Decree of the President of the Russian Federation No. 204 of May 7, 2018 On National Goals and Strategic Objectives development of the Russian Federation for the period up to 2024. *Rosavtodor: Federal Road Agency: [site]*. (In Russ.). URL: <https://bkdrf.ru/>.
5. Zolotar I. A., Puzakov N. A., Sidenko V. M., ed. Water-thermal regime of the roadbed and road clothes. Moscow: Transport; 1971. 416 p. (In Russ.).
6. Sidenko V. M. Calculation and regulation of the water-thermal regime of road clothes and roadbed. Moscow: Avtotransizdat; 1962. 116 p. (In Russ.).

7. Ivanov N. N., Puzakov N. A., Tulaev A. Ya., Androulionis E. P. Construction of highways: part 1, 2: studies. manual. Moscow: Transport; 1969. 411 p. (In Russ.).
8. Kharkhuta N. Ya., Vasiliev Yu. M. Strength, stability and compaction of soils of the roadbed. Moscow: Transport; 1975. 288 p. (In Russ.).
9. Vorobyev V. S., Bender O. A., Karelina E. L., Katalymova K. V. The concept of increasing the efficiency of maintenance and reconstruction of highways engineering structures. *Bulletin of the Siberian Transport University*. 2018;(45):11–18. (In Russ.).
10. Vorobyev V. S., Bender O. A. Assessment of the reliability of road coverings of highways according to the results of diagnostics. *Polytransport systems materials of the IX International Scientific and Technical Conference*. Novosibirsk: Siberian Transport University Publishing House; 2017. P. 172–176. (In Russ.).
11. Vorobyev V. S., Karelina E. L., Bender O. A., Katalymova K. V. Statistical models of physico-mechanical characteristics of highways soils in the area of culverts. *Bulletin of the Siberian State Automobile and Highway University*. 2018;15(62):560–573. (In Russ.).
12. Bender O. A., Vereskun V. D., Vorobyev V. S. Agent model of risk forecasting in the quality control system of road repair. *Bulletin of the Rostov Transport University*. 2013;1(49):103–108. (In Russ.).
13. Dongak D. A. Improvement of measures to improve the operational reliability of culverts on the highways of the Republic of Tyva): dissertation for competition scientific degree of Candidate of Engineering: 05.23.11 / Dongak Jamil Ayyr-Sanaevich. St. Petersburg; 2007. 159 p. (In Russ.).
14. Gerasimova E. O., Yarmolinsky A. I., Svetenok V. S. Consideration of natural and climatic conditions in the construction of culverts during the reconstruction of the highway (on the example of the section of the highway Razdolnoye – Khasan km. 49 – km. 60). *New ideas of the new century: materials of the international scientific conference Faculty of Architecture and Design, Pacific National University*. 2018;3:317–322. (In Russ.).
15. Okamura M., Ishihara M., Tamura K. Liquefied soil pressures on vertical walls with adjacent embankments. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2006;(26):265–274.
16. Schanz T. Experimental Unsaturated Soil Mechanics. Berlin; 2007. 494 p. Springer Proceedings in Physics; vol. 112.
17. Tosti F., Benedetto A., Ciampoli L. B., Lambot S., Patriarca C., Slob E. C. GPR analysis of clayey soil behavior in unsaturated conditions for pavement engineering and geoscience applications. *Near surface geophysics*. 2016;(14):127–144.
18. GOST 5180–2015 Soils. Methods of laboratory determination of physical characteristics. Date of introduction 2016-04-01. Developed by JSC Production and Research Institute for Engineering Surveys in Construction. Moscow: Standartinform; 2016. 21 p. (In Russ.).
19. GOST 12248.1–2020 Soils. Determination of strength characteristics by the single-plane cut method: introduction date 2021-06-01. Developed by NIIOSP named after N. M. Gersevanov – JSC Research Center Construction. Moscow: Standartinform; 2020. 14 p. (In Russ.).

Информация об авторах

В. С. Воробьев – декан факультета «Строительство железных дорог» Сибирского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук, профессор.

Е. Л. Карелина – аспирант кафедры «Технология, организация и экономика строительства» Сибирского государственного университета путей сообщения.

И. Б. Репина – доцент кафедры «Технология, организация и экономика строительства» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

V. S. Vorobyev – Dean of the Railway Construction Faculty, Siberian Transport University, Doctor of Engineering, Professor.

E. L. Karelina – Postgraduate Student of the Construction Technology, Organization and Economics Department, Siberian Transport University.

I. B. Repina – Associate Professor of the Construction Technology, Organization and Economics Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 04.10.2022; одобрена после рецензирования 24.10.2022; принята к публикации 25.10.2022.

The article was submitted 04.10.2022; approved after reviewing 24.10.2022; accepted for publication 25.10.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 378.1

doi 10.52170/1815-9265_2022_63_114

Количественный мониторинг электронного инженерного образования в области транспортного строительства

Сергей Иванович Герасимов^{1✉}, Александра Ивановна Галкина²,
Игорь Александрович Гришан³, Елена Юрьевна Бобкова⁴

¹ Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

^{2,3} Институт программных систем имени А. К. Айламазяна Российской академии наук, Веськово,
Ярославская область, Россия

⁴ Московский государственный университет технологий и управления имени К. Г. Разумовского,
Москва, Россия

¹ 912267@mail.ru✉

² galkina3@yandex.ru

³ grisa@yandex.ru

⁴ bobkovaalena2014@yandex.ru

Аннотация. Цифровизация инженерного образования предполагает интеграцию новых технологий в обучении, прежде всего для достижения более высоких образовательных результатов. Важно оценивать текущее состояние цифровой трансформации образовательных организаций на разных уровнях в рамках применения в учебном процессе современных технологий. Осуществляемый в настоящее время национальный проект «Цифровая экономика» порождает повышенные требования к инженерному образованию, в частности для такого сектора экономики, как транспорт. Примером служит решение Правительства России, направляющего в 2022 г. более 7 млрд р. для поддержания интеллектуальных систем в железнодорожном транспорте, который является не только приоритетным сектором экономики, но и приоритетным видом транспорта. Актуальность данной работы обусловлена постоянно меняющейся окружающей эпидемиологической обстановкой, в связи с чем высшие учебные заведения вынуждены динамично перестраивать образовательный процесс, а преподаватели – модифицировать образовательную траекторию для повышения ее эффективности. В этих условиях задача нахождения наиболее рационального баланса между традиционным и онлайн-форматами обучения становится все более актуальной. Целью исследования является анализ электронных ресурсов Сибирского государственного университета путей сообщения и разработка рекомендаций по реализации элементов интегрированной траектории образовательной программы, обеспечивающей учет особенностей направления подготовки. Распределение электронных образовательных ресурсов выполнено по пяти разновидностям: учебные, методические, дидактические, информационные, программные. Учебные инженерные общеобразовательные и специальные дисциплины поддерживают 9 специальностей и 65 специализаций. Отбор сведений об электронных ресурсах и их статистическая обработка осуществлялись автоматически с помощью программы collector_stat_maker, разработанной специалистами Объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование».

Ключевые слова: инженерное образование, электронные ресурсы, транспорт

Для цитирования: Количественный мониторинг электронного инженерного образования в области транспортного строительства / С. И. Герасимов, А. И. Галкина, И. А. Гришан, Е. Ю. Бобкова // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 4 (63). С. 114–120. DOI 10.52170/1815-9265_2022_63_114.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Quantitative monitoring of e-engineering education in the field of transport construction

Sergey I. Gerasimov^{1✉}, Alexandra I. Galkina², Igor A. Grishan³, Elena Yu. Bobkova⁴

¹ Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

^{2,3} Ailamazyan Program Systems Institute of Russian Academy of Sciences, Veskovo, Yaroslavl Region, Russia

⁴ Moscow State University of Technology and Management named after K. G. Razumovsky, Moscow, Russia

¹ 912267@mail.ru✉

² galkina3@yandex.ru

³ gria@yandex.ru

⁴ bobkovaalena2014@yandex.ru

Abstract. The digitalization of engineering education involves the integration of new technologies in education, primarily to achieve higher educational results. It is important to assess the current state of the digital transformation of educational organizations at different levels in the framework of the application of modern technologies in the educational process. The ongoing national project Digitalization of the Economy creates increased requirements for engineering education in the field of economy Transport. An example is the decision of the Russian government, which will allocate more than 7 billion rubles in 2022 to maintain intelligent systems in railway transport, which is not only a priority sector of the economy, but also a priority mode of transport. The relevance of this work is due to the constantly changing epidemiological environment, which makes it necessary to dynamically rebuild the educational process in higher educational institutions, and forces teachers to modify the educational trajectory to increase its effectiveness. Under these conditions, the task of finding the most rational balance between full-time and online learning formats is becoming increasingly important. The purpose of the study is to analyze the electronic resources of the Siberian Transport University and develop recommendations for the implementation of the elements of an integrated educational trajectory of an educational program that takes into account the specifics of the direction of training. The distribution of electronic educational resources is made according to five types: educational, methodical, didactic, informational, software. Educational engineering general education and special disciplines support 9 specialties and 65 specializations. The selection of information about electronic resources and their statistical processing was carried out automatically by the collector_stat_maker program developed by specialists from the United Fund for Electronic Resources Science and Education.

Keywords: engineering education, electronic resources, transport

For citation: Gerasimov S. I., Galkina A. I., Grishan I. A., Bobkova E. Yu. Quantitative monitoring of e-engineering education in the field of transport construction. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(63):114–120. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_63_114.

Введение

Цифровая трансформация национальной экономики России начала осуществляться в 2019 г. в соответствии с инфологической моделью, представленной на рис. 1.

Модель жизнеспособна в условиях цифровой трансформации, так как 70 % экономики страны сосредоточено в государственном секторе [1]. В настоящее время реализуется значительное количество проектов в области воздуш-

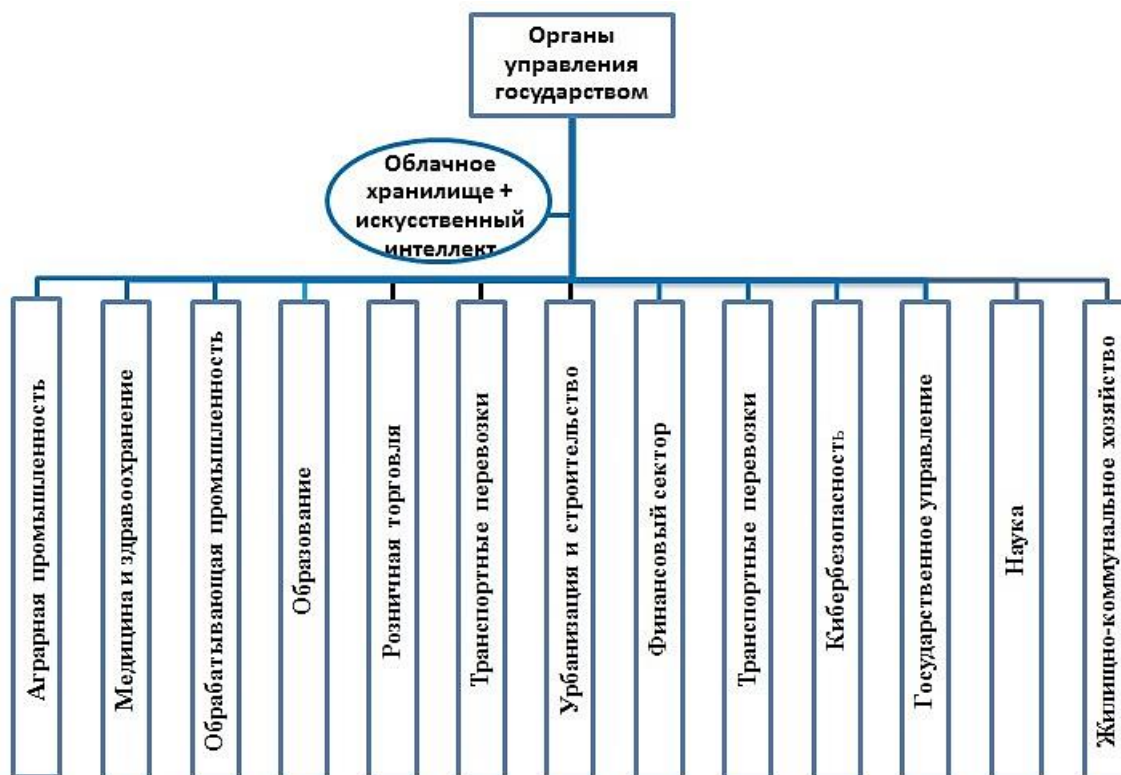


Рис. 1. Обобщенная инфологическая модель цифровой трансформации национальной экономики

ного, железнодорожного, автомобильного, речного и морского транспорта, направленных на обеспечение качественных и количественных коммуникаций по всей стране. По значимости особенно следует выделить проекты:

- строительства железнодорожных путей, связывающих Урал с Крайним Севером;
- строительства железнодорожных путей, связывающих центр России с Китаем в обход Монголии, так называемого Шелкового пути.

Данные проекты формируют социальный заказ на подготовку специалистов-инженеров сектора экономики «Транспорт».

В рамках реализации национального проекта «Цифровая экономика» государство предпринимает комплекс мер для развития и внедрения высоких технологий в разные секторы экономики, в частности в железнодорожный транспорт. Примером служит решение Правительства России, направляющего в 2022 г. более 7 млрд р. для поддержания интеллектуальных систем в железнодорожном транспорте [2].

Цель исследования

Объектом нашего исследования является современное инженерное образование на примере Сибирского государственного университета путей сообщения (СГУПС).

Целью исследования является анализ электронных ресурсов СГУПС и разработка рекомендаций по реализации элементов интегрированной траектории образовательной про-

граммы, обеспечивающей учет особенностей направления подготовки.

В СГУПС образование сегодня получают около 7 000 студентов, аспирантов и слушателей на десяти факультетах:

- «Управление процессами перевозок на железнодорожном транспорте»;
- «Строительство железных дорог»;
- «Мосты и тоннели»;
- «Управление транспортно-технологическими комплексами»;
- «Промышленное и гражданское строительство»;
- «Инженерно-экономический»;
- «Мировая экономика и право»;
- «Управление персоналом»;
- «Бизнес-информатика»;
- «Заочный».

Фундаментом современного инженерного образования являются электронные ресурсы, которые представляют собой предмет нашего исследования. Восходящий поток электронных ресурсов образования имеет тенденцию к количественному возрастанию, что демонстрирует график на рис. 2.

Рассматриваемый восходящий поток из 147 ресурсов анализируется в соответствии с формо-функциональным признаком (рис. 3).

Как демонстрирует диаграмма, преимущество принадлежит электронным ресурсам образования, в разработке которых приняли уча-

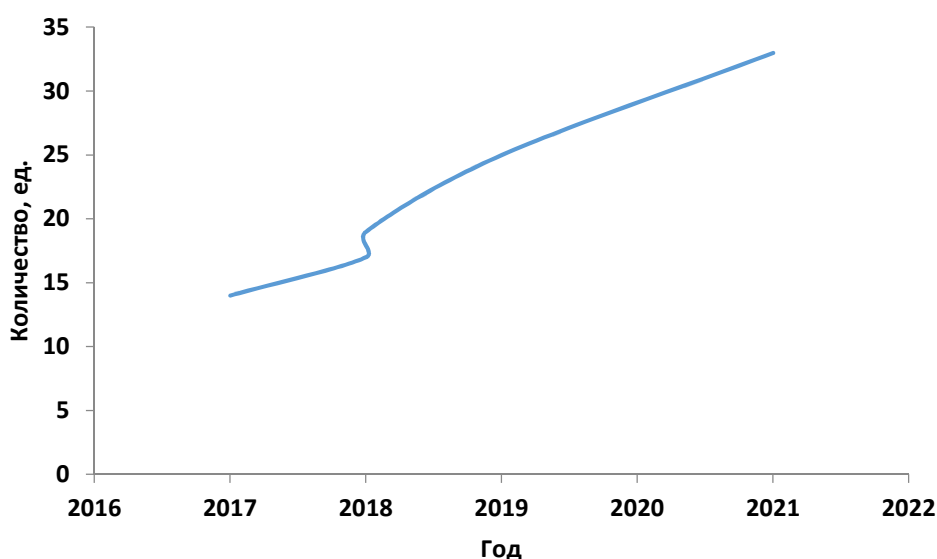


Рис. 2. Распределение электронных ресурсов по годам

стие 153 автора: преподаватели и студенты университета. В то же время сотрудники университета стараются представлять свои научные результаты и в популярных научных электронных изданиях [3–6].

Методы исследования

Методами исследования электронных образовательных ресурсов являются методы статистики, аналитики и логики. Статистическая обработка осуществляется посредством программы `collector_stat_maker` [7], которая не только статистически обрабатывает исходный массив данных, но и строит диаграммы, позволяющие провести количественный мониторинг электронных ресурсов образования по 12 показателям оценки состава, качества, формы и разновидности электронных образовательных ресурсов.

Рассматриваемые электронные ресурсы образования имеют разновидности, представленные на рис. 4.

Таким образом, преимущество имеют учебные электронные образовательные ресурсы, предназначенные для непосредственной передачи знаний по 67 учебным дисциплинам (рис. 5).

Как демонстрирует диаграмма, учебными электронными образовательными ресурсами поддерживаются не только общепрофессиональные дисциплины, но и специальные дисциплины, осуществляющие подготовку инженеров по 9 специальностям и 65 специализациям (рис. 6).

В инженерном образовании СГУПС выделяются две категории специалистов:

- специалисты в области информационных и интеллектуальных технологий, предназначенные для решения задач цифровой трансформации сектора экономики «Транспорт»;
- специалисты-профессионалы, непосредственно работающие в секторе экономики «Транспорт».

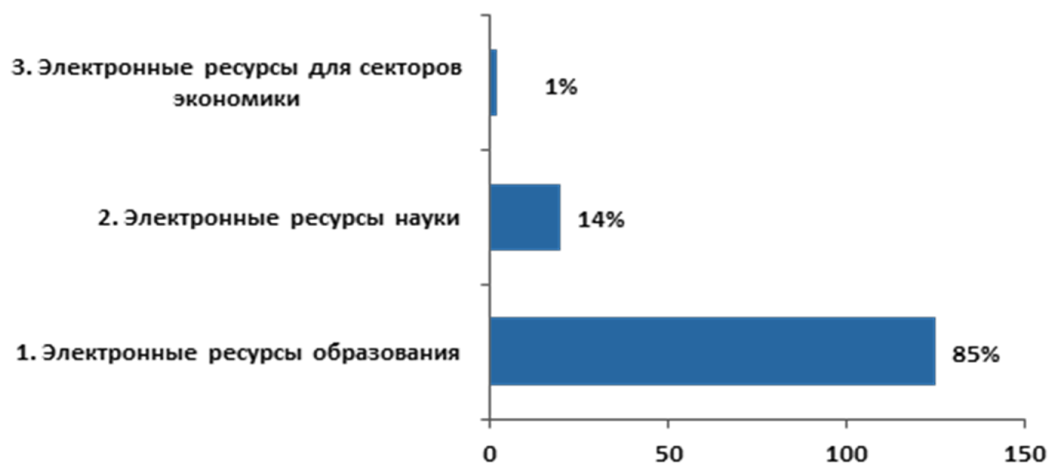


Рис. 3. Распределение электронных ресурсов по пулам

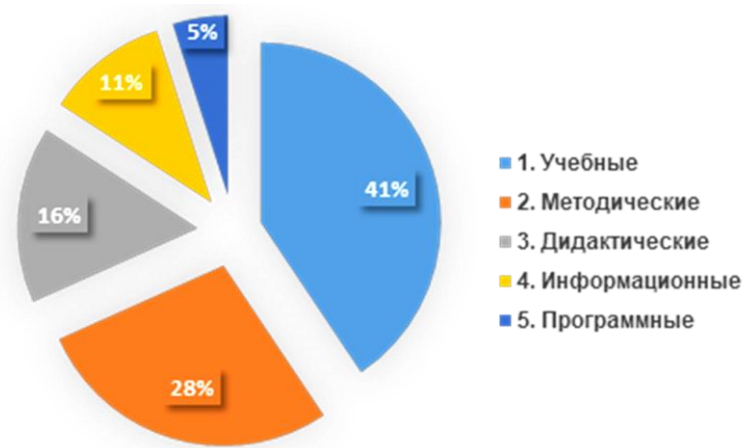


Рис. 4. Распределение электронных образовательных ресурсов по разновидностям

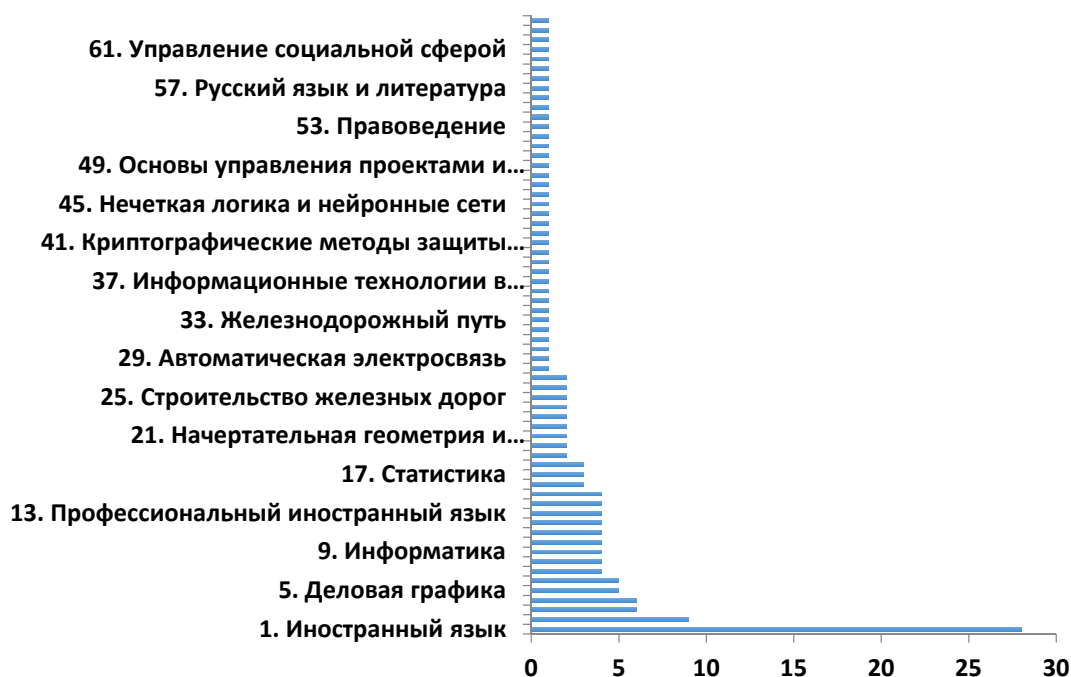


Рис. 5. Распределение учебных электронных образовательных ресурсов по учебным дисциплинам



Рис. 6. Распределение электронных образовательных ресурсов по специализациям

Выводы

На основе проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Наиболее эффективной методикой обучения представляется смешанный формат, при котором онлайн-технологии применяются как для общепрофессиональных дисциплин,

ориентированных на инженерные специальности, так и для специальных дисциплин по направлению «Транспорт».

2. В инженерной подготовке специалистов по направлению «Транспорт» выделяются два блока специальностей: блок специальностей ИТ-специалистов, предназначенных для осу-

шествления цифровой трансформации сектора экономики «Транспорт», и блок подготовки специалистов-профессионалов, предназначенных непосредственно для работы на транспорте. Таким образом, в целях цифровой трансформации сектора экономики «Транспорт» осуществляется современное инженерное образование, отвечающее требованиям социального заказа [8–10].

Подтверждение

Анализируемые электронные ресурсы размещены на сервере Сибирского государственного университета путей сообщения. Информация о рассмотренных электронных ресурсах находится в открытом доступе на портале Объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование» (ОФЭРНиО).

Список источников

1. Чернопьятов А. М., Ахметов Л. А., Джураев Д. М. Государственный сектор в экономике Российской Федерации // *Фундаментальные исследования*. 2018. № 4. С. 138–145.
2. Более 7 млрд рублей будет направлено в регионы на внедрение интеллектуальных транспортных систем (распоряжение от 3 февраля 2022 года № 169-р). URL: <http://government.ru/docs/44485/> (дата обращения: 06.02.2022).
3. Gerasimov S., Sych T., Kuleshov V. Application of Finite Elements Method for Improvement of Acoustic Emission Testing // *Journal of Physics : Conference Series*. 2016. Vol. 671, no. 1. P. 012017. DOI 10.1088/1742-6596/671/1/012017.
4. Gerasimov S. I., Sych T. V. Finite element modelling of acoustic emission sensor // *Journal of Physics : Conference Series*. 2017. Vol. 881, no. 1. P. 012003. DOI 10.1088/1742-6596/881/1/012003.
5. Gerasimov S. I., Sych T. V. Numerical modelling and experimental analysis of acoustic Emission // *Journal of Physics : Conference Series*. 2018. Vol. 1015, no. 3. P. 032039. DOI 10.1088/1742-6596/1015/3/032039.
6. Gerasimov S., Igumnova T. Modelling of Ultrasonic Wave Propagation Through the Border of Two Mediums // *Technological Advancements in Construction. Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022. Vol. 180. P. 255–263. https://doi.org/10.1007/978-3-030-83917-8_24.
7. Галкина А. И., Гришан И. А. Цифровая трансформация образования в зеркале электронных образовательных ресурсов: статистика, аналитика, прогноз : сборник аналитических обзоров. Веськово : Институт программных систем им. А. К. Айламазяна РАН, 2022. 124 с. URL: https://ofernio.ru/portal/projects/sbornik_2022/sbornik_2022.pdf (дата обращения: 10.06.2022).
8. Большакова Е. И., Туровская В. В. Железнодорожный транспорт как ведущий транспорт России // *Информатизация и виртуализация экономической и социальной жизни : материалы VII Всероссийской студенческой научно-практической конференции с международным участием*. Иркутск, 2019. С. 267–269.
9. Борисова С. В. Управление интеллектуальной собственностью на транспорте (на примере железнодорожного транспорта) // *Транспортное право и безопасность*. 2016. № 12 (12). С. 7–16.
10. Куцевол Н. А., Соколова В. С. Железнодорожный транспорт с точки зрения экологии в сравнении с другими видами транспорта // *E-Scio*. 2020. № 9 (48). С. 227–232.

References

1. Chernopyatov A. M., Akhmetov L. A., Juraev D. M. Public sector in the economy of the Russian Federation. *Fundamental research*. 2018;(4):138–145.
2. More than 7 billion rubles will be allocated to regions to implement intelligent transport systems (Decree of February 3, 2022, no. 169-r). URL: <http://government.ru/docs/44485/>.
3. Gerasimov S., Sych T., Kuleshov V. Application of Finite Elements Method for Improvement of Acoustic Emission Testing. *Journal of Physics: Conference Series*. 2016;671(1):012017. DOI 10.1088/1742-6596/671/1/012017.
4. Gerasimov S. I., Sych T. V. Finite element modelling of acoustic emission sensor. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017;881(1):012003. DOI 10.1088/1742-6596/881/1/012003.
5. Gerasimov S. I., Sych T. V. Numerical modelling and experimental analysis of acoustic emission. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018;1015(3):032039. DOI 10.1088/1742-6596/1015/3/032039.
6. Gerasimov S., Igumnova T. Modelling of Ultrasonic Wave Propagation through the Border of Two Mediums. *Technological Advancements in Construction. Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022;180:255–263. https://doi.org/10.1007/978-3-030-83917-8_24

Software Systems of the Russian Academy of Sciences; 2022. 124 p. (In Russ.). URL: https://ofernio.ru/portal/projects/sbornik_2022/sbornik_2022.pdf.

8. Bolshakova E. I., Turovskaya V. V. Railway transport as a leading transport of Russia. *Informatization and virtualization of economic and social life. Materials of VII All-Russian student scientific-practical conference with international participation*. Irkutsk; 2019. P. 267–269. (In Russ.).

9. Borisova S. V. Intellectual property management in transport (on the example of railway transport). *Transport Law and Security*. 2016;(12):7–16. (In Russ.).

10. Kutsevol N. A., Sokolova V. S. Railway transport in terms of ecology in comparison with other modes of transport. *E-Scio*. 2020;(48):227–232. (In Russ.).

Информация об авторах

С. И. Герасимов – профессор кафедры «Строительная механика» Сибирского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук.

А. И. Галкина – руководитель Объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование» Института программных систем им. А. К. Айламазяна Российской академии наук.

И. А. Гришан – научный сотрудник Института программных систем им. А. К. Айламазяна Российской академии наук.

Е. Ю. Бобкова – доцент Московского государственного университета технологий и управления им. К. Г. Разумовского, кандидат педагогических наук.

Information about the authors

S. I. Gerasimov – Professor of the Structural Mechanics Department, Siberian Transport University, Doctor of Engineering.

A. I. Galkina – Head of the Joint Fund of Electronic Resources Science and Education, Department of the Ailamazyan Program Systems Institute of Russian Academy of Sciences.

I. A. Grishan – Researcher at the Ailamazyan Program Systems Institute of Russian Academy of Sciences.

E. Yu. Bobkova – Associate Professor, Moscow State University of Technology and Management named after K. G. Razumovsky, Candidate of Pedagogical Sciences.

Статья поступила в редакцию 30.08.2022; одобрена после рецензирования 19.10.2022; принята к публикации 25.10.2022.

The article was submitted 30.08.2022; approved after reviewing 19.10.2022; accepted for publication 25.10.2022.

Информация для авторов

1. Предоставляемый материал должен быть оригинальным, не опубликованным ранее в других печатных изданиях.

2. Статья предоставляется в электронном виде в форматах doc, docx или rtf и одновременно в бумажном виде, отпечатанном в формате А4 с полуторным интервалом (гарнитура Times New Roman, кегль 14 pt; поля: верхнее и нижнее – 20, левое – 30, правое – 10 мм). Файл с текстом статьи должен быть назван фамилией автора (например: Иванов.doc).

3. Статья должна содержать:

- тип статьи (например, научная, обзорная, рецензия);
- УДК;
- название статьи;
- фамилию, имя и отчество каждого автора, место его работы/учебы, город, страну, ученую степень, звание, должность;
- аннотацию на русском и английском языках;
- ключевые слова на русском и английском языках;
- библиографический список на русском и английском языках.

4. Список источников составляется в порядке упоминания литературы в тексте и приводится в конце рукописи. Список должен содержать не менее 10 источников, из них собственных статей должно быть не более 30 %.

5. Графический материал должен быть выполнен в графических редакторах, поддерживающих векторную и растровую графику. Иллюстрации должны быть четкими, все подписи на рисунке должны хорошо читаться и иметь расшифровку. Если в тексте есть фотография, отсканированный рисунок, то они обязательно должны быть представлены также отдельным файлом в исходном графическом формате (например: jpeg, tiff).

6. Статья для опубликования в журнале и заявка отправляются по адресу: vestnik.stu@yandex.ru.

7. В редакцию предоставляются оригиналы документов: экспертное заключение о возможности опубликования статьи, статья и заявка.

8. Публикация статей в журнале бесплатная.

Более подробную информацию по вопросам опубликования статей и размещения другой информации в журнале можно найти на сайте издания.



www.stu.ru/science



vestnik.stu@yandex.ru



+7 383 328-04-36



630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук,
191, корп. 3, комн. 307



Главный редактор *А. Л. Манаков*
Заместитель главного редактора *А. Д. Абрамов*
Заместитель главного редактора *С. В. Карасев*
Ответственный секретарь *М. С. Галай*
Редактор перевода текста на английский язык *И. И. Степачкова*
Редакторы: *Е. Е. Рыжкова, А. О. Елесина, Ю. В. Печенкина*
Корректор *Б. В. Устинов*
Макет, верстка *Ю. В. Борцовой*
Дизайн обложки *А. С. Петренко*

Учредитель
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет путей сообщения»

Адрес редакции
630049, Россия, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, корп. 3, комн. 307.
Телефон/факс: (383) 328-04-36.
E-mail: vestnik.stu@yandex.ru

Адрес издателя
630049, Россия, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191.
Телефон/факс: (383) 328-03-81.
E-mail: bvu@stu.ru

Подписано в печать 20.12.2022. Дата выхода в свет 22.12.2022
Тираж 350 экз. Формат 60×84/8
Объем 14,6 уч.-изд. л., 15,25 усл.-печ. л. Заказ № 3770

Цена свободная

Отпечатано в издательстве СГУПС.
630049, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191
Тел. (383) 328-03-81; e-mail: bvu@stu.ru



Издательство Сибирского государственного
университета путей сообщения

ISSN 1815-9265
Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения
2022. № 4 (63). 1–122