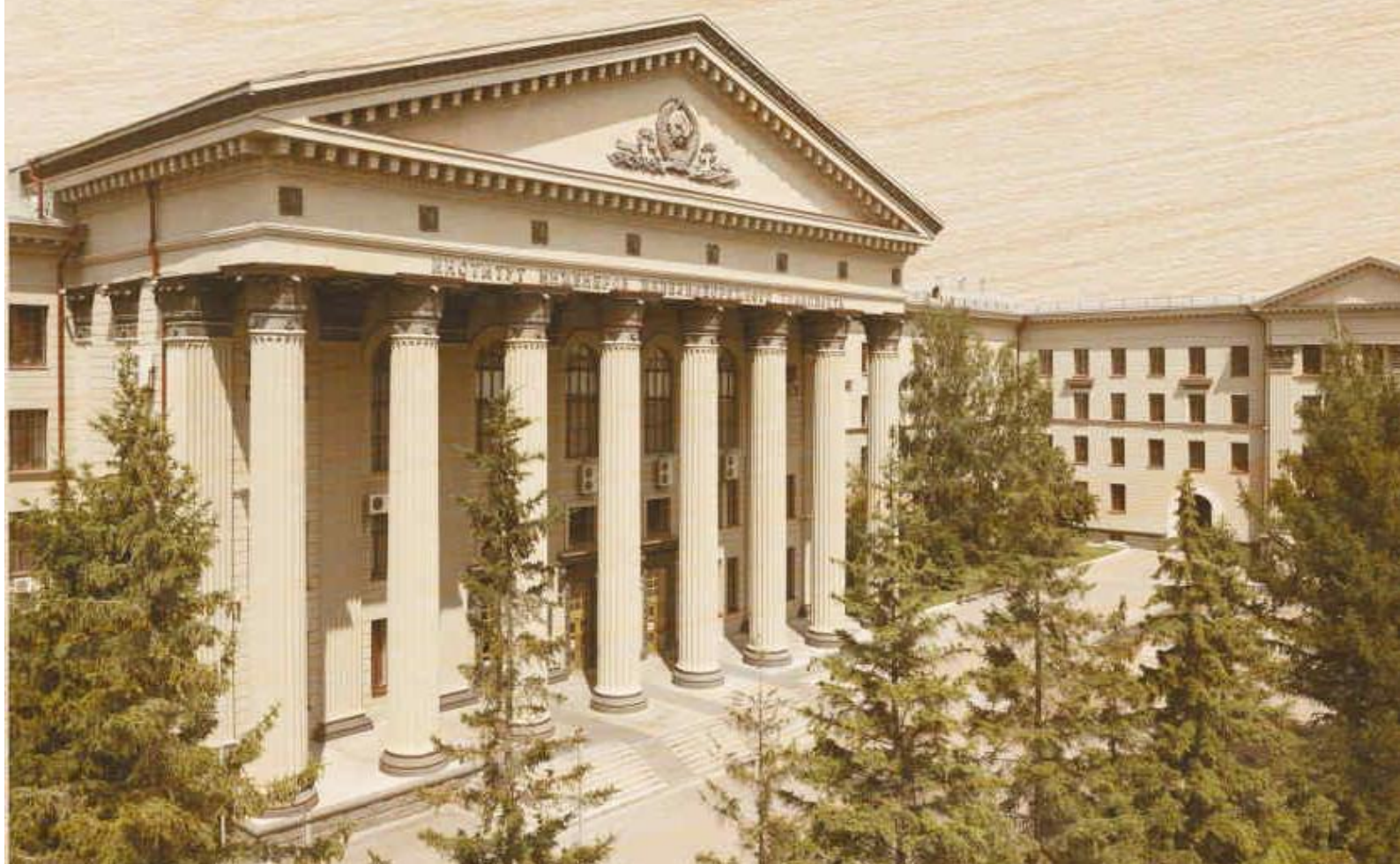


ISSN 1815-9265

ВЕСТНИК

Сибирского государственного
университета путей сообщения

№ 5 (77). 2025 16+



УЧРЕДИТЕЛЬ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»

Состав редколлегии

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

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

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

Прозонин 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

Редактор *Е. Е. Рыжкова*

Корректор *А. А. Игумнов* – 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, Professor

Deputy Editor

A. D. Abramov, Doctor of Engineering, 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

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 Saint Petersburg State Transport University, Saint Petersburg

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

English Text Reviewer

I. I. Stepachkova, Senior Lecturer

Text Reviewer **E. E. Ryzhkova**

Managing Editor **A. A. Igumnov**, 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: vestniksgups@sibgups.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, на соискание ученой степени доктора наук, по научным специальностям 2.9 «Транспорт» и 2.1 «Строительство и архитектура»

№ 5 (77) · 2025 · ОКТЯБРЬ – ДЕКАБРЬ · 16+

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

СОДЕРЖАНИЕ

Транспорт

<i>Пренинг Р. Д., Ильин Н. Ю., Стрехнин Г. А., Анисимов В. А.</i> Программа подбора водопропускных сооружений при автоматизированном трассировании железных дорог...	5
<i>Нейман В. А., Воронцов Д. С.</i> Исследование процесса теплообмена при охлаждении рельса	15
<i>Севостьянов А. А., Величко Д. В., Ардышев И. К., Тархов В. А.</i> Техническое состояние стрелочных переводов в сложных эксплуатационных и сезонных климатических условиях Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры	21
<i>Тушин Н. А., Слободянюк И. Г., Раевская П. Е., Тимухин К. М.</i> Структурно-функциональный подход к развитию пропускной способности железнодорожных полигонов	30
<i>Воробьев В. С., Манаков А. Л.</i> Предпосылки развития транспортной системы Сибирской и Арктической зон России: Северо-Сибирская магистраль.....	42
<i>Климов А. А.</i> Исследование элемента продольного профиля «противоуклон» в выходной части сортировочного парка.....	50
<i>Милорадович В. К., Ильиных А. С., Юркова Е. О., Аксенов В. А., Култан М. А.</i> Обеспечение организационно-технологической надежности производственного процесса шлифования рельсов	59
<i>Климов А. А., Осипов Д. В., Числов О. Н.</i> Методика расчета вероятности возникновения сверхнормативных нагрузок на узлы вагонов при прохождении перевальной части горки.....	72
<i>Вакуленко С. П., Роменский Д. Ю., Еришов А. Д., Калинин К. А., Красильников П. А.</i> О резервах повышения пропускной способности железнодорожных линий при ускорении посадки-высадки пассажиров пригородных поездов	82
<i>Корнеев М. В., Бурдяк П. С.</i> Совершенствование способа применения резиновых подкладок для перевозки 40-футовых контейнеров в полувагонах.....	92

Строительство и архитектура

<i>Лабутин Н. А., Ланг А. В., Васютина Т. В., Касаджик Ю. П.</i> Особенности динамической работы пролетных строений пешеходных путепроводов над путями высокоскоростных железнодорожных магистралей	100
<i>Караулов А. М., Королев К. В., Шохирев М. В., Просяников Б. Д.</i> Определение начальной несущей способности двухслойных консолидирующихся оснований ленточных фундаментов	111

Included in the List of peer-reviewed scientific editions, in which the main scientific results of dissertations for the degree of Candidate of Sciences, for the degree of Doctor of Sciences should be published, for scientific specialties 2.9 "Transport" and 2.1 "Construction and Architecture"

№ 5 (77) • 2025 • October – December • 16+

Issued quarterly. Established in 1999

CONTENTS

Transport

- R. D. Prening, N. Yu. Ilyin, G. A. Strehnin, V. A. Anisimov.* Program for selecting culverts during automated railway tracing5
- V. A. Neyman, D. S. Vorontsov.* Investigation of the heat exchange progress during rail cooling15
- A. A. Sevostyanov, D. V. Velichko, I. K. Ardyshev, V. A. Tarkhov.* The technical condition of the track switches in difficult operational and seasonal climatic conditions of the West Siberian Infrastructure Directorate21
- N. A. Tushin, I. G. Slobodyanyuk, P. E. Raevskaya, K. M. Timukhin.* Structural and functional approach to the development of railway polygon capacity30
- V. S. Vorobyov, A. L. Manakov.* Prerequisites for the development of the transport system of the Siberian and Arctic zones of Russia: The North-Siberian Railway42
- A. A. Klimov.* Study of the longitudinal profile element 'anti-slope' in the output part of the marshalling yard50
- V. K. Miloradovich, A. S. Ilinykh, E. O. Yurkova, V. A. Aksenov, M. A. Kultan.* Ensuring the organizational and technological reliability of the rail grinding process59
- A. A. Klimov, D. V. Osipov, O. N Chislov.* Methodology for calculating the probability of excessive loads on wagon nodes when passing the hump section72
- S. P. Vakulenko, D. Yu. Romensky, A. D. Ershov, K. A. Kalinin, P. A. Krasilnikov.* Potential for increasing railway line capacity through accelerated passenger boarding in commuter trains82
- M. V. Korneev, P. S. Burdyak.* Improving the method of using rubber linings for FEU-containers placement during transportation in gondola cars92

Building and Architecture

- N. A. Labutin, A. V. Lang, T. V. Vasutina, Yu. P. Kasadzhik.* Dynamic performance of pedestrian overpass superstructures over high-speed railway tracks100
- A. M. Karaulov, K. V. Korolev, M. V. Shokhirev, B. D. Prosyaniukov.* Determination of the initial bearing capacity of two-layer consolidating bases of strip foundations111

TRANSPORT

Научная статья
УДК 656.519.67
doi:10.52170/1815-9265_2025_77_5

Программа подбора водопропускных сооружений при автоматизированном трассировании железных дорог

Ростислав Денисович Пренинг¹, Николай Юрьевич Ильин², Глеб Андреевич Стрехнин³,
Владимир Александрович Анисимов⁴✉

^{1, 2, 3, 4} Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
Санкт-Петербург, Россия

¹ kolga139@yandex.ru

² nikolay.ilyin.02@mail.ru

³ glebstrehnin@gmail.com

⁴ anisvl@mail.ru✉

Аннотация. Предметом исследования является одна из ключевых задач, решаемых при трассировании железных дорог, – подбор водопропускных труб и малых мостов. Правильно выбранные водопропускные сооружения, их параметры и положение на трассе должны обеспечивать безопасность и бесперебойность движения поездов. В современных системах автоматизированного проектирования железных и автомобильных дорог задача выбора типа и размеров водопропускных труб и малых мостов до сих пор решается или с применением ручных графических методов, или в режиме диалога проектировщика с соответствующими программами, что увеличивает время и трудоемкость проектирования, а также риск ошибок в проекте. Целью работы является автоматизация и оптимизация подбора малых водопропускных сооружений при трассировании железных дорог.

Анализ работ по исследуемой теме позволил определить этапы разработки программного обеспечения. На первом этапе выполнена оцифровка графиков водопропускной способности труб и малых мостов, создана база данных, разработан алгоритм и компьютерная программа подбора типов и размеров малых водопропускных сооружений без допущения аккумуляции воды в замыкающем створе водосбора. На следующих этапах запланировано расширение функциональных возможностей программы, в частности автоматический поиск точек пересечения трассой структурных линий логов цифровой модели местности для установления планового и высотного положения труб и малых мостов; автоматизация расчета по координатам и высотам характерных точек структурных линий водоразделов, логов и трассы площади бассейна и уклона главного лога с последующим определением расхода воды, притекающего к створу водопропускного сооружения; расчеты показателей трудоемкости, продолжительности, строительной стоимости сооружений для оптимального выбора их типа и размера.

Разрабатываемая программа предназначена для автоматического подбора типа и размера малых водопропускных сооружений при решении задачи оптимального трассирования железных дорог. Ее интеграция с системами автоматизированного проектирования линейных сооружений позволит сократить затраты времени на разработку проектных решений и повысить их качество по стоимостным показателям эффективности.

Ключевые слова: железная дорога, автоматизированное проектирование, трассирование, водопропускное сооружение, проектная линия, оптимизация

Для цитирования: Программа подбора водопропускных сооружений при автоматизированном трассировании железных дорог / Р. Д. Пренинг, Н. Ю. Ильин, Г. А. Стрехнин, В. А. Анисимов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 5 (77). С. 5–14. DOI 10.52170/1815-9265_2025_77_5.

TRANSPORT

Original article

Program for selecting culverts during automated railway tracing

Rostislav D. Prening¹, Nikolay Yu. Ilyin², Gleb A. Strehnin³, Vladimir A. Anisimov⁴✉

^{1, 2, 3, 4} Empreror Alexander I Saint Petersburg transport University, Saint Petersburg, Russia

¹ kolga139@yandex.ru

² nikolay.ilyin.02@mail.ru

³ glebstrehnin@gmail.com

⁴ anisvl@mail.ru✉

Abstract. The subject of the study is one of the key tasks solved in tracing railways – the selection of culverts and small bridges. Properly selected culverts, their parameters and position on the route should ensure the safety and uninterrupted movement of trains. In modern computer-aided railway and highway design systems, the task of choosing the type and size of culverts and small bridges is still solved either using manual graphical methods or in the designer's dialogue with appropriate programs, which increases the time and complexity of design, as well as the risk of errors in the project. The aim of the work is to automate and optimize the selection of small culverts when tracing railways.

An analysis of the work on the topic under study allowed us to determine the stages of software development. At the first stage, the graphs of the water transmission capacity of pipes and small bridges were digitized, a database was created, an algorithm and a computer program for selecting the types and sizes of small culverts were developed without allowing water accumulation in the closing section of the catchment area. At the next stages, it is planned to expand the functionality of the program, in particular, automatically search for points where the route intersects the structural lines of logs of a digital terrain model to establish the planned and elevation positions of pipes and small bridges, automate the calculation of the coordinates and heights of the characteristic points of the structural lines of watersheds, logs and the route of the basin area and the slope of the main log, followed by the determination of water flow, flowing to the culvert, calculations of labor intensity, duration, the construction cost of structures for optimal selection of their type and size.

The developed program is designed to automatically select the type and size of small culverts when solving the problem of optimal railway tracing. Its integration with computer-aided design systems for linear structures will reduce the time spent on developing design solutions and improve their quality in terms of cost-effectiveness.

Keywords: railway, automated design, tracing, culvert, design line, optimization

For citation: Prening R. D., Ilyin N. Yu., Strehnin G. A., Anisimov V. A. Program for selecting culverts during automated railway tracing. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(77):5–14. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_77_5.

Введение

При проектировании железных и автомобильных дорог неизбежно возникает необходимость пересечения различных форм рельефа, включая русла постоянных и временных водотоков. Земляное полотно дороги, представляя собой искусственно возведенное сооружение, оказывает существенное влияние на процессы поверхностного стока, нарушая его естественное течение. Для исключения неблагоприятных последствий в насыпях размещают водопропускные сооружения (ВС), обеспечивающие поперечный пропуск водных потоков через тело земляного полотна. От того, насколько грамотно они размещены на трассе дороги, правильно выбраны их параметры, в частности размер отверстия, зависят безопасность и бесперебойность движения транспорта.

В процессе трассирования железных дорог при определении положения проектной линии на продольном профиле проектировщик неоднократно решает задачу подбора типа и размера малых ВС (труб и малых мостов), которые должны обеспечить безопасную и бесперебойную эксплуатацию дороги. Данная задача относится к вариативным, так как строительные затраты на возведение ВС должны быть экономически обоснованы. Несмотря на то что для ее решения разрабатывались [1] и разрабатываются [2–7] программы для ЭВМ, в современных системах автоматизированного проектирования (САПР) железных и автомобильных дорог под-

бор водопропускных сооружений не автоматизирован полностью [8, 9].

В существующих САПР с помощью соответствующих программных модулей, таких как «Топоматик Robur – Искусственные сооружения» [10], «IndorCulvert» [11], «КРЕДО ГРИС_С», «КРЕДО ГРИС_Т» [12] и «ТИМ КРЕДО ТРУБЫ» [13], реализовано автоматизированное проектирование конструкции ВС с учетом рельефа местности и гидравлических характеристик стока поверхностных вод, протекающего к створу сооружения. Их принципы работы схожи и не имеют особых отличий. Они включают в себя широкий перечень типовых проектов ВС, из которого проектировщик может выбрать готовое решение. Исходными данными для проектирования являются цифровая модель местности (ЦММ), план и продольный профиль трассы дороги, пикетажное положение ВС, рабочая отметка насыпи, поперечные профили земляного полотна и данные о гидрологических характеристиках местности. Проектировщик в режиме диалога с программой выполняет гидравлические расчеты ВС и принимает проектное решение на основе анализа отчета, который включает в себя пропускную способность сооружения, чертежи его конструктивных элементов, схемы, ведомости проектных данных, спецификации. Использование функционала данных программ при трассировании дороги не обеспечивает автоматического подбора

типа и размера ВС. По каждому сооружению необходимо отдельно выполнять гидравлические расчеты для обоснования его выбора, что не применимо при решении задачи оптимального проектирования плана и продольного профиля трассы дороги.

На кафедре «Изыскания и проектирование железных дорог» ПГУПС разработана концепция новой технологии проектирования железных дорог в информационно-цифровой среде [14]. Для ее реализации проводится научно-исследовательский вычислительный эксперимент с целью совершенствования методов оптимального трассирования железных дорог в сложных условиях пересеченного рельефа местности на основе комплексной математической модели плана и продольного профиля трассы. Одним из параметров данной модели является минимальная допускаемая высота насыпи для размещения ВС в логу, пересекаемом трассой. Она определяет минимальную проектную отметку бровки земляного полотна в логу и зависит:

- от величины стока поверхностных вод, притекающего к створу сооружения;
- типа, размера и водопропускной способности ВС, выбранного для пропуска водного потока через тело насыпи;
- наивысшего уровня воды перед ВС при пропуске наибольшего паводка с учетом подпора, наката волны на откос, ветрового нагона, волнового нагона, приливных и ледовых явлений.

Оптимизация проектной линии относительно продольного профиля земли и подбор водопропускных сооружений – взаимосвязанные задачи. Изменения рабочих отметок в месте расположения ВС не только влияют на его стоимость, но и требуют учитывать ограничения на применение их типов и размеров. Поэтому для внедрения методов оптимального трассирования в автоматизированное проектирование железных дорог необходимо решить задачу автоматического подбора типа и размера ВС при изменении проектных отметок бровки земляного полотна в логу.

В [15] взаимосвязь процесса поиска оптимального положения проектной линии с задачей выбора ВС предлагается формализовать с помощью зависимости его стоимости от рабочих отметок насыпи с учетом высотных ограничений применения соответствующих типов и размеров ВС.

В данной статье авторами рассматривается задача автоматизации и оптимизации подбора водопропускных труб и малых мостов при трассировании железных дорог с целью определения минимальной допускаемой высоты насыпи в месте размещения ВС и его строительной стоимости.

Материалы и методы исследования

Существующая методика размещения и подбора малых водопропускных сооружений при проектировании железных дорог базируется на исследованиях В. А. Копыленко [16, 17]. На основе гидравлических расчетов водопропускных труб и малых мостов разработаны графические методы по выбору типа сооружения, его конструкции, размера его отверстия, исходя из условий безопасной эксплуатации железной дороги. Для их использования рассчитаны и построены графики возможной водопропускной способности по всем основным типам труб и малым мостам (рис. 1), применяемым в России при строительстве железных дорог.

Эти графики стали информационной основой для разработки базы данных по малым ВС. Ее структура с форматом полей приведена в таблице.

При выборе типа, конструкции и размера ВС его возможную водопропускную способность сравнивают с потребной, которая определяется по соответствующим методикам в зависимости от гидрологических характеристик притекающего к створу сооружения стока поверхностных вод [2, 4, 17–22].

Исходя из геометрических и гидравлических параметров ВС и потребной водопропускной способности графическими методами находят наивысший уровень подпора воды $h_{\text{п}}$ перед сооружением при пропуске наибольшего паводка с заданной вероятностью его превышения. При необходимости учитывают подпор от стеснения потока воды, накат волны на откос, ветровой и волновой нагоны, приливные и ледовые явления.

Одним из требуемых условий проектирования продольного профиля трассы дороги на подходах к ВС является предотвращение затопления насыпи при пропуске наибольшего расхода воды через сооружение. Чтобы обеспечить выполнение данного условия, бровка насыпи должна возвышаться над наивысшим расчетным уровнем воды не менее чем на 0,5 м [23, 24]. Другим условием является обеспечение конструктивных требований безопасной эксплуатации сооружения под воздействием статических и динамических нагрузок.

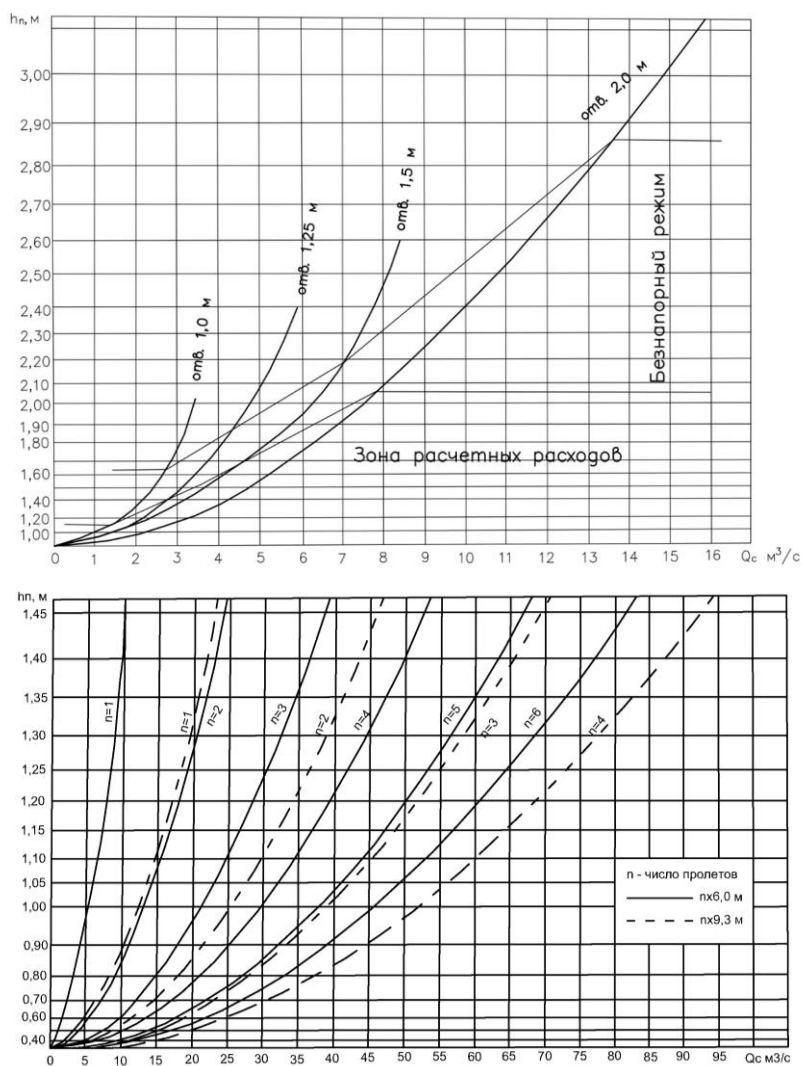


Рис. 1. Графики возможной водопропускной способности круглой железобетонной трубы и малого эстакадного моста

Структура базы данных по водопропускным трубам и малым мостам

id BC	Тип BC	Размер отверстия BC, м	Возможная водо-пропускная спо-собность Q_c %, м³/с	Высота подпора воды h_n , м	id режима работы BC	Высота насыпи по конструктивным условиям разме-щения BC, м	id ограничений по применению BC	Стоимость 1 п. м. BC, тыс. р.
КЖБТ1×1	КЖБТ	1 × 1,0	0,95	1,00	б/н	1,42	1*2*	8,505
КЖБТ1×1	КЖБТ	1 × 1,0	1,30	1,10	б/н	1,42	1*2*	8,505
...	...	...	...	...	...	...	1*2*	...
КЖБТ1×1	КЖБТ	1 × 1,0	2,60	1,60	б/н	1,42	1*2*	8,505
КЖБТ1×1	КЖБТ	1 × 1,0	2,70	1,63	б/н	1,42	1*2*	8,505
...	...	...	...	...	...	...	...	...
ЖБМ1×6	ЖБМ	1 × 6,0	1,0	0,45	б/н	2,00	3*	84,030
...	...	...	...	...	...	...	...	...

Примечания: 1. Стоимость 1 п. м. сооружения указана по базовым укрупненным показателям, рассчитанным в ценах на 01.01.2000.

2. б/н – безнапорный режим работы BC.

Учитывая эти требования, величину минимальной допускаемой высоты насыпи для размещения малого ВС определяют по формуле

$$h_{\min}^{\text{BC}} = \max(h_{\text{п}} + 0,5, h_{\text{к}}^{\text{BC}}),$$

где $h_{\text{к}}^{\text{BC}}$ – высота насыпи по конструктивным условиям размещения ВС.

Результаты исследования

В рамках решения задачи автоматизации подбора ВС при трассировании железных дорог выполнена оцифровка графиков водопропускной способности труб и малых мостов, создана база данных (см. таблицу) и определены этапы разработки программного обеспечения.

На первом этапе:

1. Сформулированы основные функциональные требования к программе:

- автоматическое определение возможных допускаемых вариантов ВС для пропуска через тело насыпи наибольшего паводка с заданной вероятностью его превышения;

- визуализация допускаемых вариантов водопропускных сооружений со значениями критериев оценки проектного решения для выбора ВС;

- принятие оптимального решения – выбор наилучшего сооружения по заданным критериям.

2. Разработаны алгоритм подбора ВС (рис. 2) и программный код для его исполнения, с помощью которого после ввода значения расчетного расхода воды $Q_{\text{р}}$, определенного по номограммам (рис. 3) в зависимости от уклона главного лога J и площади водосбора F , из базы данных формируется выборка всех водопропускных сооружений, обеспечивающих выполнение условия $Q_{\text{с}} \geq Q_{\text{р}}$ при безнапорном режиме работы ВС. Полученная выборка ранжируется по возрастанию значений минимальной допускаемой высоты насыпи $h_{\min}^{\text{BC}}$ и используется в составлении упорядоченного списка ВС, предлагаемого проектировщику для принятия решения.

В предложенном алгоритме реализован подбор ВС без допущения аккумуляции воды в замыкающем створе водосбора.

На следующих этапах с целью развития функциональных возможностей программы и ее применения в рамках новой технологии проектирования железных дорог в информационно-цифровой среде [14] планируется:

1. Разработать алгоритм и программный код для автоматического определения планового и высотного положения водопропускных сооружений проектируемой железной дороги в точках пересечения трассой структурных линий логов цифровой модели местности.

2. Автоматизировать расчет площади бассейна и уклона главного лога по координатам и высотам характерных точек структурных линий водоразделов, логов и трассы, а также расхода воды, притекающего к створу водопропускного сооружения.

3. Добавить в базу данных по водопропускным трубам и малым мостам ограничения по их применению и разработать программный код для их учета при выборе ВС (см. таблицу). К данным ограничениям относятся:

- максимальная высота насыпи;

- максимальная длина ВС;

- местные условия, ограничивающие применение ВС (карчеход, наледи, большое количество взвешенных частиц и т. п.);

- объем аккумуляции воды в замыкающем створе водосбора;

- режимы работы ВС при пропуске наибольшего расхода;

- скорость течения воды.

4. Разработать математическую модель и программный код расчета строительной стоимости ВС при решении задачи поиска оптимального положения трассы на продольном профиле.

5. Разработать алгоритм и программный код для автоматизации определения дополнительных затрат по предохранению земляного полотна от затопления и размыва в зависимости от положения проектной линии относительно продольного профиля земли в пределах замыкающего створа водосбора. К ним относят затраты на увеличение высоты насыпи, укрепление ее откосов, возведение водоразделительной дамбы для исключения перелива воды в смежный водосбор, устройство глухих кюветов с целью предотвращения затопления соседней выемки.

6. Добавить в базу данных по водопропускным трубам и малым мостам характеристики, учитывающие технологию строительства дороги и отдельных ее участков, изготовления деталей и возведения ВС, климатические условия района проектирования и требования типизации.

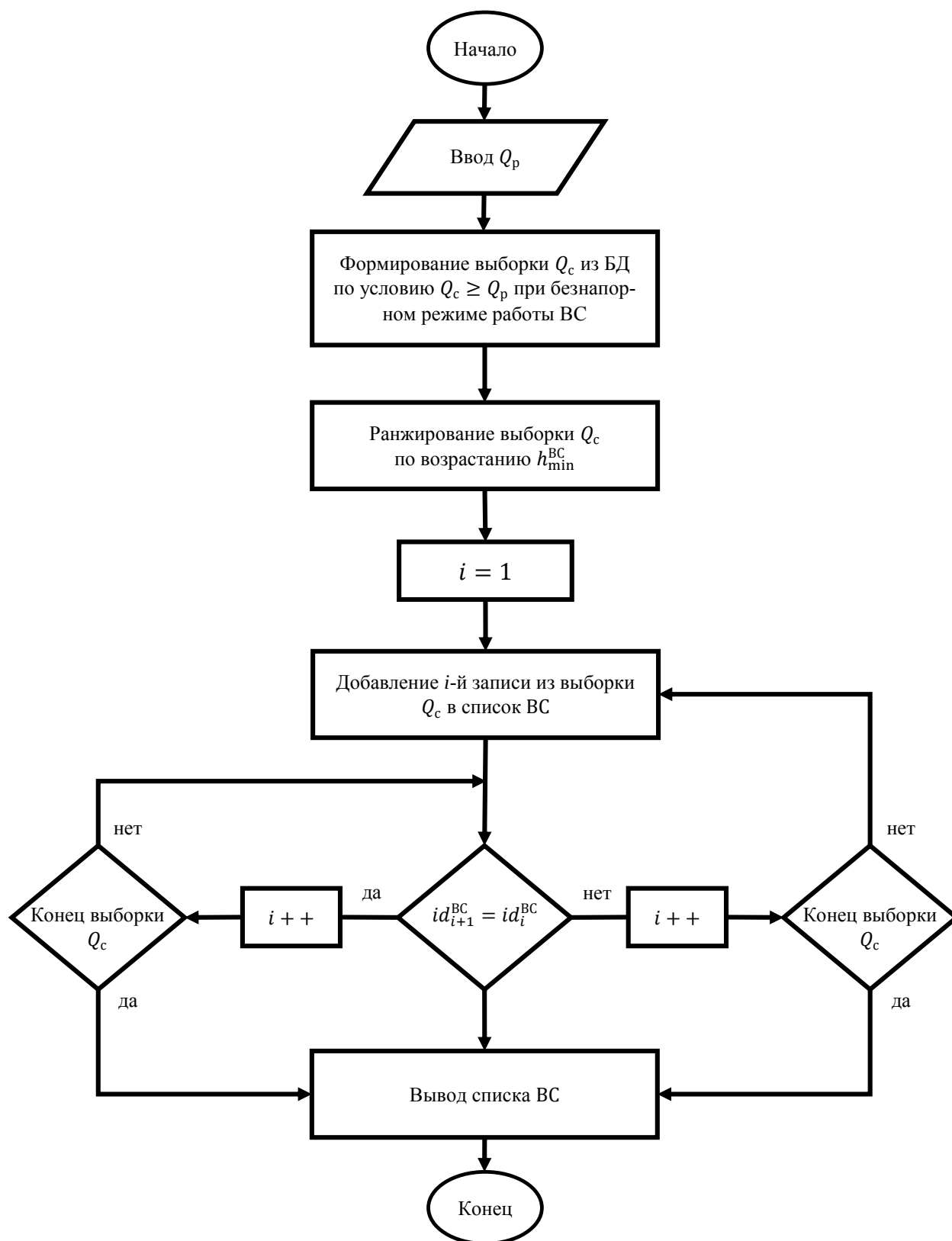


Рис. 2. Алгоритм подбора водопропускных сооружений без допущения аккумуляции воды в замыкающем створе водосбора

7. Автоматизировать процедуру подбора оптимальных типов и размеров ВС с учетом технологии строительства по показателям трудоем-

кости, продолжительности и стоимости возведения водопропускных сооружений на железных дорогах [25, 26].

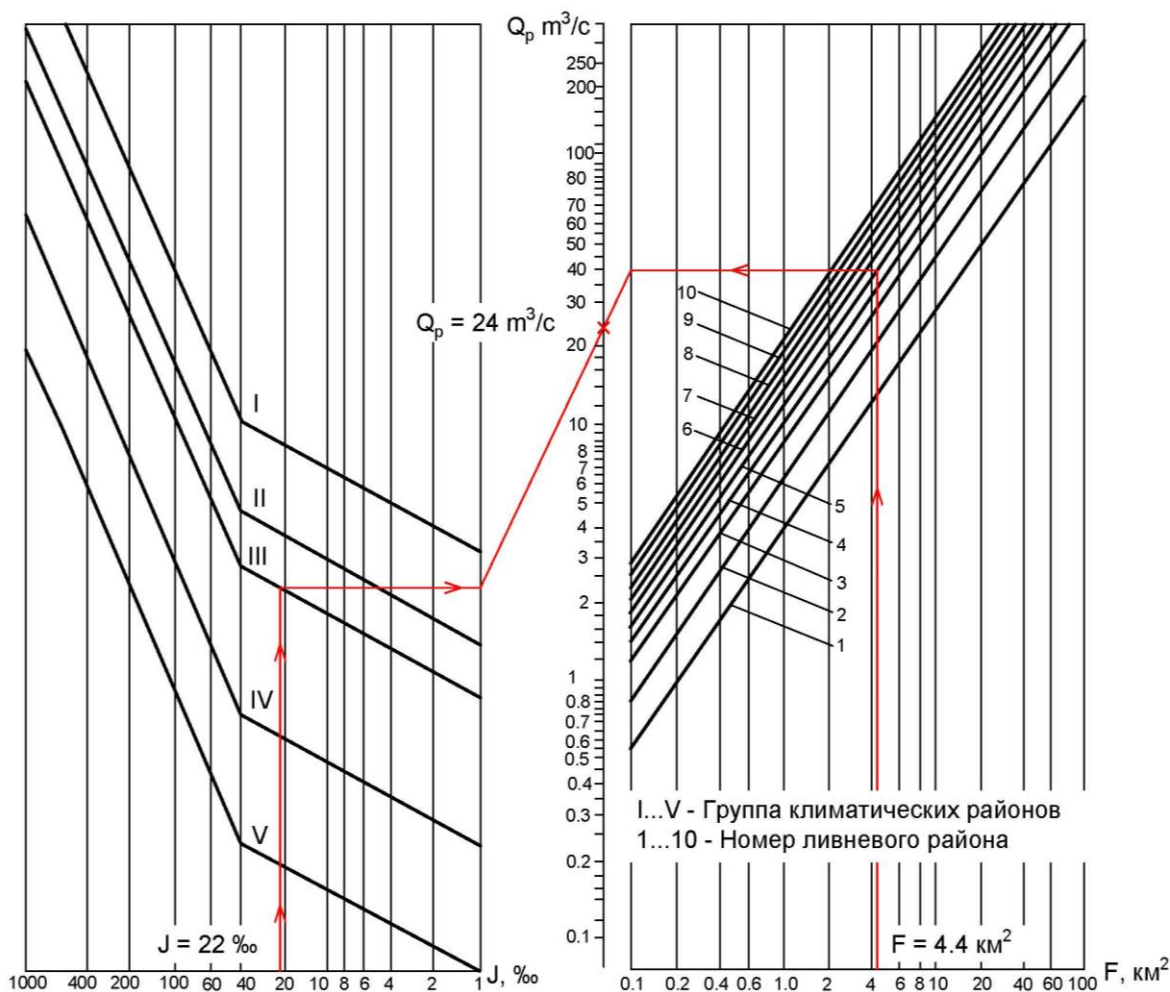


Рис. 3. Номограмма для определения ливневых расходов вероятности превышения 1 : 100 или 1 % для водосборов песчаными и супесчаными почвами

На первом этапе разработки программы подбора ВС при трассировании железных дорог рассматривалась задача оптимизации проектной линии на участках с одним сооружением. При размещении нескольких ВС необходимо выполнять их подбор на основе требований типизации, оптимизируя сроки и стоимость строительства, детально сравнивая строительную стоимость конкурентоспособных вариантов с учетом изготовления, доставки и монтажа ВС, а также сопутствующих затрат:

- по устройству продольных водоотводов, углублению русл, укреплению откосов и русл, устройству дамб;
- изменению рабочих отметок земляного полотна на походах к ВС;
- возмещению стоимости земель, строений, дорог и коммуникаций в зоне затопления искусственными водоемами.

Выводы

При проектировании железных дорог на участках со сложными условиями пересеченного рельефа местности приходится размещать и выбирать большое число водопропускных сооружений. Их подбор должен производиться на основе детального технико-экономического сравнения, что представляет собой сложную и трудоемкую задачу. Ее решение в САПР выполняется в диалоговом режиме, что в первую очередь связано с использованием графических методов определения потребной водопропускной способности, подбора типа, конструкции и размера ВС, обеспечивающих поперечный пропуск водных потоков, безопасность и бесперебойность движения транспорта.

В рамках разработки новой технологии проектирования железных дорог в информационно-цифровой среде авторами проводятся научные исследования по совершенствованию

методов поиска оптимального положения трассы на основе комплексной математической модели плана и продольного профиля. Задачи оптимального трассирования дороги и подбора типа и размера ВС взаимосвязаны.

В статье рассмотрены этапы разработки программы для решения задачи оптимального подбора водопропускных труб и малых мостов при трассировании железных дорог. Представлены результаты первого этапа:

– база данных по водопропускным трубам и малым мостам;

– алгоритм подбора водопропускных сооружений без допущения аккумуляции воды в замыкающем створе водосбора.

Разрабатываемая программа должна обеспечить автоматический выбор малых ВС при поиске оптимального положения трассы железных дорог, а ее интеграция с САПР линейных сооружений позволит сократить затраты времени на разработку проектных решений и повысить их качество по стоимостным показателям эффективности.

Список источников

1. Волченков Г. Я., Цыпин В. Ш., Орбачевский С. А. Выбор типов малых водопропускных сооружений с применением ЭВМ // Сборник трудов ЦНИИСа. Вып. 91. Вопросы мостовой гидравлики и гидрологии. Москва, 1976. С. 39–61.
2. Подвербный В. А., Гнездилова О. А., Холодов П. Н. Разработка программы расчета ливневого стока по инструкции ВСН 63-76 // Образование – Наука – Производство : материалы VI Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием) : в 2 т. Чита, 2022. С. 115–123.
3. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2023660244, 18.05.2023. Программа для расчета ливневого стока (ЛИСТОК) : № 2023619318 : заявл. 11.05.2023 / Холодов П. Н., Подвербный В. А.
4. Холодов П. Н., Немитовская Д. В., Подвербный В. А. Автоматизация расчета стока весеннего половодья по приближенной методике СОЮЗДОРНИИ // Заметки ученого. 2023. № 3. С. 46–57.
5. Москаленко К. А., Подвербный В. А. Автоматизация определения строительной стоимости круглых железобетонных труб // Современные технологии и инновационные решения в области технических наук : сборник научных статей. Москва, 2024. С. 148–151.
6. Москаленко К. А., Подвербный В. А. Автоматизация определения строительной стоимости металлических гофрированных труб // Современные технологии и инновационные решения в области технических наук : сборник научных статей. Москва, 2024. С. 152–155.
7. Подвербный В. А. Изучение особенностей выбора прямоугольных бетонных труб при автоматизированном определении их строительной стоимости // Технологии будущего: синергия науки и практики : сборник научных статей. Ульяновск, 2025. С. 19–21.
8. Волкова Е. В., Солоненко А. И. Конструирование и расчет водопропускных сооружений на автомобильных дорогах с использованием комплекса ГРИС программы CREDO III // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2014. № 6 (11). С. 54–61.
9. Методика расчета водопропускной способности малых искусственных сооружений с использованием программы КРЕДО ГРИС_Т / В. А. Подвербный, П. Н. Холодов, Д. А. Ковенькин, Е. В. Филатов // Инфраструктура транспорта. 2021. № 2 (2). С. 67–79.
10. Топоматик Robur – Искусственные сооружения // Научно-производственная фирма «Топоматик» : [сайт]. URL: <https://topomatic.ru/products/culverts/> (дата обращения: 07.07.2025).
11. IndorCulvert : проектирование водопропускных труб // ИндорСофт : [сайт]. URL: <https://www.indorsoft.ru/products/culvert/> (дата обращения: 07.07.2025).
12. ГРИС 2.1 / Компания «Кредо-Диалог» // Технологии CREDO : [сайт]. URL: <https://credo-dialogue.ru/produkty/207-gris-naznachenie.html> (дата обращения: 07.07.2025).
13. ТИМ КРЕДО ТРУБЫ / Компания «Кредо-Диалог» // Технологии CREDO : [сайт]. URL: <https://credo-dialogue.ru/produkty/tim-kredo-truby.html> (дата обращения: 07.07.2025).
14. Анисимов В. А., Булакаева О. С., Шкурников С. В. Функциональная модель системы автоматизированного проектирования железных дорог в информационно-цифровой среде // Бюллетень результатов научных исследований. 2022. Вып. 4. С. 117–130.
15. Струченков В. И. Методы оптимизации трасс в САПР линейных сооружений. Москва : Солон-Пресс, 2014. 272 с.
16. Копыленко В. А. Современные представления о выборе отверстия малых водопропускных сооружений // Транспортное строительство. 2011. № 3. С. 20–23.
17. Копыленко В. А. Изыскания и проектирование железных дорог. Москва : УМЦ ЖДТ, 2021. 690 с.

18. Определение расхода стока весеннего половодья на периодических водотоках при проектировании железных дорог / П. Н. Холодов, Д. А. Ковенькин, Д. В. Немитовская, В. А. Подвербный // Наукосфера. 2023. № 3-2. С. 226–235.
19. СП 33-101–2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. Москва : Госстрой России, 2004. 73 с.
20. Пособие по гидравлическим расчетам малых водопропускных сооружений. Москва : Транспорт, 1992. 408 с.
21. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. Ленинград : Гидрометиздат, 1984. 448 с.
22. ВСН 63–76. Инструкция по расчету ливневого стока воды с малых бассейнов. Москва : Оргтрансстрой, 1976. 104 с.
23. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы : актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84* : (с Изменением № 1) : утверждены приказом Министерства регионального развития Российской Федерации от 28.12.2010. № 822 : введены в действие 20.05.2011. Москва : ОАО «ЦПП», 2011. 321 с.
24. СП 119.13330.2024. Железные дороги колеи 1520 мм : актуализированная редакция СНиП 32-01–95 : утверждены приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 01.07.2024 № 432/пр : введены в действие 02.07.2024. Москва : Минстрой России, 2024. 223 с.
25. ГЭСН 81-02-28–2020. Сборник 28. Железные дороги. Москва : 2020. 141 с.
26. ГЭСН 81-02-30–2020. Сборник 30. Мосты и трубы. Москва : 2020. 109 с.

References

1. Volchenkov G. Ya., Tsypin V. Sh., Orbachevsky S. A. Selection of small water-crossing types of structures with the use of computers. *Proceedings of Central Scientific Research Institute of Construction. Issue 91, Issues of bridge hydraulics and hydrology*. Moscow; 1976. P. 39–61. (In Russ.).
2. Podverbny V. A., Gnezdilova O. A., Kholodov P. N. Development of a program for calculating storm runoff according to the VSN 63-76 instruction. *Education – Science – Production. Proceedings of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference (with international participation)*. In 2 volumes. Chita; 2022. P. 115–123. (In Russ.).
3. Kholodov P. N., Podverbny V. A. Program for calculating storm runoff (LISTOK). Certificate of registration of the computer program RU 2023660244, 18.05.2023. Application No. 2023619318 dated 11.05.2023. (In Russ.).
4. Kholodov P. N., Nemitovskaya D. V., Podverbny V. A. Automation of Spring Flood Runoff Calculation Using the Approximate Methodology of SOYUZDORNII. *Notes of a Scientist*. 2023;(3):46–57. (In Russ.).
5. Moskalenko K. A., Podverbny V. A. Automation of Determining the Construction Cost of Round Reinforced Concrete Pipes. *Modern Technologies and Innovative Solutions in the Field of Technical Sciences. Proceedings of Scientific Articles*. Moscow; 2024. P. 148–151. (In Russ.).
6. Moskalenko K. A., Podverbny V. A. Automation of Determining the Construction Cost of Metal Corrugated Pipes. *Modern Technologies and Innovative Solutions in the Field of Technical Sciences. Proceedings of Scientific Articles*. Moscow; 2024. P. 152–155. (In Russ.).
7. Podverbny V. A. Study of the Features of the Selection of Rectangular Concrete Pipes in the Automated Determination of Their Construction Cost. *Technologies of the Future: Synergy of Science and Practice. Proceedings of Scientific Articles*. Ulyanovsk; 2025. P. 19–21. (In Russ.).
8. Volkova E. V., Solonenko A. I. Design and Calculation of Water Passages on Roads Using the CREDO III Gris Complex. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Investments. Construction. Real Estate*. 2014;(11):54–61. (In Russ.).
9. Podverbny V. A., Kholodov P. N., Kovenkin D. A., Filatov E. V. Methodology for calculating the water-carrying capacity of small artificial structures using the CREDO GRIS_T program. *Transport Infrastructure*. 2021;(2):67–79. (In Russ.).
10. Topomatic Research and Production Company. *Topomatic Robur – Artificial Structures*: [site]. (In Russ.). URL: <https://topomatic.ru/products/culverts/>.
11. IndorSoft LLC. Indor Culvert. (In Russ.). URL: <https://www.indorsoft.ru/products/culvert/>.
12. CREDO-DIALOG COMPANY LLC. GRIS 2.1. (In Russ.). URL: <https://credo-dialogue.ru/produkty/207-gris-naznachenie.html>.
13. CREDO-DIALOG COMPANY LLC. TIM CREDO CULVERTS. (In Russ.). URL: <https://credo-dialogue.ru/produkty/tim-kredo-truby.html>.
14. Anisimov V. A., Bulakaeva O. S., Shkurnikov S. V. Functional Model of the Automated Railway Design System in the Information and Digital Environment. *Bulletin of Research Results*. 2022. Issue 4. 117–130. (In Russ.).

15. Struchenkov V. I. *Methods of Route Optimization in CAD for Linear Structures*. Moscow: Solon-Press; 2014. 272 p. (In Russ.).
16. Kopylenko V. A. Modern ideas about the choice of small culverts. *Transport Construction*. 2011;(3):20–23. (In Russ.).
17. Kopylenko V. A. *Railway Surveying and Design*. Moscow: UMC ZHDT; 2021. 690 p. (In Russ.).
18. Kholodov P. N., Kovenkin D. A., Nemitovskaya D. V., Podverbny V. A. Determination of the flow rate of spring floods on periodic watercourses during the design of railways. *Naukosfera*. 2023;(3-2):226–235. (In Russ.).
19. SP 33-101-2003. Determination of the main calculated hydrological characteristics. Moscow: Gosstroy of Russia; 2004. 73 p. (In Russ.).
20. Manual on hydraulic calculations of small culverts. Moscow: Transport; 1992. 408 p. (In Russ.).
21. Manual on the determination of calculated hydrological characteristics. Leningrad: Gidrometizdat; 1984. 448 p. (In Russ.).
22. VSN 63-76. Instructions for calculating stormwater runoff from small pools. Moscow: Orgtransstroy; 1976. 104 p. (In Russ.).
23. SP 35.13330.2011. Bridges and pipes. Updated version of SNiP 2.05.03-84* (with amendment No. 1). Approved by Order of the Ministry of Regional Development of the Russian Federation dated 28.12.2010 No. 822: effective 20.05.2011. Moscow: TSPP; 2011. 321 p. (In Russ.).
24. SP 119.13330.2024. Railways of 1520 mm gauge. Updated version of SNiP 32-01-95. Approved by Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated 01.07.2024 No. 432/pr: effective 02.07.2024. Moscow: Ministry of Construction of Russia; 2024. 223 p. (In Russ.).
25. GESN 81-02-28-2020 Proceedings No. 28. Railways. Moscow; 2020. 141 p. (In Russ.).
26. GESN 81-02-30-2020 Proceedings No. 30. Bridges and pipes. Moscow; 2020. 109 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Р. Д. Пренинг – аспирант кафедры «Изыскания и проектирование железных дорог» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

Н. Ю. Ильин – студент факультета «Транспортное строительство» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

Г. А. Стрехнин – студент факультета «Транспортное строительство» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

В. А. Анисимов – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Изыскания и проектирование железных дорог» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

Information about the authors

R. D. Prening – Postgraduate of the Railway Survey and Design Department, Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University.

N. Yu. Ilyin – Student, Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University.

G. A. Strehnin – Student, Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University.

V. A. Anisimov – Doctor of Engineering, Associate Professor, Professor of the Railway Survey and Design Department, Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University.

Статья поступила в редакцию 03.07.2025; одобрена после рецензирования 24.09.2025; принята к публикации 06.10.2025.

The article was submitted 03.07.2025; approved after reviewing 24.09.2025; accepted for publication 06.10.2025.

Научная статья
УДК 625.042.3
doi:10.52170/1815-9265_2025_77_15

Исследование процесса теплообмена при охлаждении рельса

Вячеслав Александрович Нейман^{1✉}, Денис Сергеевич Воронцов²

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

¹ Flinston154@yandex.ru✉

² den.sv78@ya.ru

Аннотация. Бесстыковой путь широко применяется на железных дорогах России. Закрепление рельсовых плетей при ремонтных работах необходимо производить при строго определенной температуре, что обеспечивает отсутствие дополнительных температурных напряжений в эксплуатации. В условиях ограниченного временного окна для проведения работ, особенно в регионах с жарким летним периодом, актуальной задачей является разработка методов ускоренного и контролируемого охлаждения рельсов. Цель работы – экспериментальное исследование эффективности применения вынужденной конвекции от вихревой трубки и водяного распыления для охлаждения рельса типа R65 до температуры закрепления. Проведена серия натурных экспериментов по охлаждению предварительно нагретого до 65 °С отрезка рельса. Исследованы два режима: естественное охлаждение и охлаждение с помощью комбинированного воздействия направленного потока холодного воздуха от вихревой трубки (–20 °С) и мелкодисперсного водяного распыления (0,1 л/мин). Температурные поля контролировались тепловизором. Результаты экспериментов верифицированы методом математического моделирования в ПО SolidWorks. Установлено, что применение комбинированного метода (вихревой трубки и водяного распыления) позволяет сократить время охлаждения рельса до требуемой температуры 30 °С в среднем на 95 % по сравнению с естественной конвекцией. Метод обеспечивает равномерное температурное поле в сечении рельса, зафиксированные градиенты температуры не превышали 5 °С/мм, что снижает риск возникновения значительных остаточных напряжений. Результаты математического моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными. Разработанный метод принудительного комбинированного охлаждения является эффективным и перспективным для применения в путевом хозяйстве с целью оптимизации графика ремонтно-путевых работ. Научно обоснована возможность его использования для обеспечения требуемых температурных условий закрепления рельсовых плетей. Перспективы дальнейших исследований связаны с оптимизацией параметров установки, масштабированием технологии на всю длину плети и оценкой ее экономической эффективности.

Ключевые слова: вихревая трубка, эффект Ранка – Хилша, математическое моделирование, течение газа, термогазодинамические параметры

Для цитирования: Нейман В. А., Воронцов Д. С. Исследование процесса теплообмена при охлаждении рельса // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 5 (77). С. 15–20. DOI 10.52170/1815-9265_2025_77_15.

Original article

Investigation of the heat exchange progress during rail cooling

Vyacheslav A. Neyman^{1✉}, Denis S. Vorontsov²

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

¹ Flinston154@yandex.ru✉

² den.sv78@ya.ru

Abstract. Continuous welded rail is widely used on Russian railways. During maintenance operations, rail strings must be fixed at a strictly defined neutral temperature, which ensures the absence of additional thermal stresses during service. Given the limited time window for such operations, particularly in regions with hot summers, the development of methods for accelerated and controlled rail cooling is a pressing task. The aim of this study is to experimentally investigate the efficiency of forced convection from a vortex tube combined with water spraying for cooling an R65 rail to the required neutral temperature. A series of full-scale experiments was conducted on a rail segment preheated to 65 °C. Two cooling regimes were examined: natural cooling, and combined cooling using a directed flow of cold air from a vortex tube (–20 °C) together with fine water spraying (0.1 L/min). Temperature fields were monitored with a thermal imaging camera. The experimental results were verified by mathematical

modeling in Solid Works. It was established that the combined method (vortex tube and water spraying) reduces the cooling time of the rail to the target temperature of 30 °C by an average of 95% compared to natural convection. The method also ensures a uniform temperature distribution across the rail section, with temperature gradients not exceeding 5 °C/mm, thereby minimizing the risk of significant residual stresses. The modeling results showed good agreement with the experimental data. The developed forced combined cooling method has proven to be efficient and holds promise for application in railway track maintenance to optimize work schedules. Its feasibility for providing the required thermal conditions for rail fastening has been scientifically substantiated. Future research will focus on optimizing system parameters, scaling the technology to full-length rails, and evaluating its economic efficiency.

Keywords: vortex tube, Rank – Hilsch effect, mathematical modeling, gas flow, thermo-gas dynamics parameters

For citation: Neyman V. A., Vorontsov D. S. Investigation of the heat exchange progress during rail cooling. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(77):15–20. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_77_15.

Введение

Железнодорожный путь представляет собой сложную техническую систему, включающую множество элементов, одним из которых является рельс. В процессе эксплуатации рельсы подвергаются значительным механическим и температурным нагрузкам. Особенно это актуально для регионов с высокими годовыми амплитудами температур, таких как Сибирь и Дальний Восток, где температура рельсов в летний период может значительно превышать температуру окружающей среды. Для обеспечения прочности и устойчивости бесстыкового пути критически важно закреплять рельсовые плети при определенной температуре, так называемой температуре закрепления (для Западно-Сибирского региона это $(30 \pm 5) ^\circ\text{C}$) [1].

Работы по укладке новых или замене существующих рельсовых плетей (ремонтные работы) часто планируются на периоды с благоприятной температурой (осень, раннее утро). Однако в реальных условиях рельсы не всегда успевают остыть до требуемой температуры закрепления естественным путем к моменту начала работ. Это создает необходимость разработки методов ускорения процесса охлаждения рельсов. Принудительное охлаждение должно обеспечивать не только скорость, но и равномерность распределения температуры по сечению рельса для минимизации остаточных напряжений, термических деформаций и, как следствие, риска аварий и сокращения срока службы [2]. Таким образом, разработка эффективных и контролируемых методов охлаждения рельсов является актуальной научно-практической задачей для повышения надежности и безопасности железнодорожной инфраструктуры.

Целью данного исследования является разработка научных основ применения вынужденной конвекции воздуха для ускорения и выравни-

вания процесса охлаждения рельсов перед ремонтно-путевыми работами с целью повышения надежности их последующей эксплуатации.

Задачи исследования включают:

1. Экспериментальное исследование кинетики охлаждения рельса Р65 при естественной конвекции и при вынужденной – от направленного воздушного потока, генерируемого вихревой трубкой, и распыления воды с помощью форсунки.

2. Сравнительный анализ эффективности методов охлаждения по времени достижения требуемой температуры ($\sim 30 ^\circ\text{C}$) и равномерности температурного поля в сечении рельса.

3. Оценка влияния вынужденной конвекции на величину температурных градиентов в материале рельса.

Для обеспечения долговечности и безопасности железнодорожных путей рельсы должны быть правильно охлаждены перед укладкой и ремонтом. Если охлаждение было недостаточным или неравномерным, в металле возникают опасные остаточные напряжения и деформации, ведущие к преждевременному износу и повышающие вероятность аварий. Таким образом, поиск и внедрение эффективных технологий охлаждения становится ключевым фактором надежности всей инфраструктуры.

Решение этой задачи связано с организацией вынужденной конвекции. В этом случае тепло отводится не естественным путем, а за счет принудительной подачи охладителя (жидкости или газа). Этот подход позволяет не только резко увеличить скорость охлаждения, но и добиться равномерного температурного поля по всему рельсу, что жизненно важно при эксплуатации путей под высокими нагрузками.

Процесс охлаждения рельсов можно разделить на несколько этапов: сначала происходит нагрев рельса при его эксплуатации, затем следует этап отвода тепла, и, наконец, рельс

остывает до температуры окружающей среды. На каждом из этих этапов важную роль играет конвекция. В условиях естественной конвекции охлаждение происходит медленно и неравномерно, что может приводить к локальным перегревам и, как следствие, к термическим напряжениям и деформациям рельса. Общие принципы теплопроводности и теплопередачи, лежащие в основе этих процессов, подробно описаны в работах А. В. Лыкова [3] и В. П. Исаченко [4] соответственно.

Вынужденная конвекция позволяет значительно ускорить процесс охлаждения за счет увеличения скорости движения охлаждающей среды (воздуха или жидкости) вокруг рельса. Это достигается путем использования вентиляторов, насосов или других устройств, создающих направленный поток. На рис. 1 представлена расчетная схема вынужденной конвекции, включающая форсунки (Ф) и вихревые трубки (ВТ).

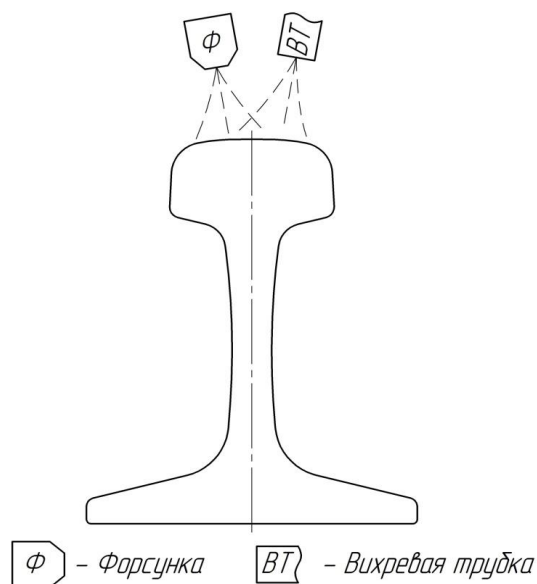


Рис. 1. Расчетная схема вынужденной конвекции

Вихревые трубки, основанные на эффекте Ранка – Хилша, представляют собой перспективное направление для систем охлаждения. Этот эффект заключается в разделении потока газа на горячий и холодный в вихревой трубке, что позволяет получить холодный воздух без использования хладагентов [5]. Теория и расчет эффекта Ранка подробно описаны в работах В. И. Кузнецова [6] и Ш. А. Пиралишвили и соавторов [5]. Математическое моделирование эффекта энергоразделения Ранка – Хилша с целью увеличения энергетических характеристик

вихревой трубы рассматривается А. С. Носковым и соавторами [7]. Вихревые аппараты и трубы нового поколения также изучались А. Д. Сусловым [8] и А. И. Азаровым [2] соответственно. Применение вихревых трубок потенциально может обеспечить более эффективное и экономичное охлаждение по сравнению с традиционными системами, особенно в условиях, где требуется локальное охлаждение или отсутствие движущихся механических частей.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования служил отрезок бывшего в употреблении рельса Р65 длиной 1,2 м. Рельс предварительно нагревался в печи до начальной температуры 65 °С по всему сечению, что контролировалось термопарами, установленными в характерных точках (головка, шейка, подошва). После нагрева рельс извлекался из печи и размещался на теплоизолирующих подставках.

Были исследованы два режима охлаждения:

- 1) естественное охлаждение на теплоизолирующих подставках;
- 2) принудительное комбинированное охлаждение с использованием вихревой трубки и системы водяного распыления.

Параметры вихревой трубки: расход сжатого воздуха 250 л/мин, температура холодного потока на выходе из ВТ –20 °С. Поток воздуха подавался на головку рельса.

Параметры водяной форсунки: расход воды 0,1 л/мин, температура 20 °С.

Температура поверхности рельса и окружающей среды (~20 °С) непрерывно регистрировалась с помощью тепловизора Testo 875-1i с интервалом 5 с. Для обеспечения статистической достоверности в каждом режиме было проведено по пять идентичных экспериментов.

Для верификации экспериментальных данных было выполнено математическое моделирование процесса охлаждения в ПО SolidWorks с коэффициентом теплоотдачи $\alpha = 500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Схема эксперимента с вынужденной конвекцией представлена на рис. 1. Охлаждение осуществлялось направленным потоком холодного воздуха, генерируемым одной вихревой трубкой и водяной форсункой. Поток воздуха от ВТ подавался непосредственно на головку рельса вдоль его продольной оси, расположенной на расстоянии 10 мм от поверх-

ности рельса. Водяная форсунка, направленная на рельс, способствует интенсификации охлаждения. Это происходит за счет скрытой теплоты парообразования.

Результаты исследования

Экспериментальные данные для естественного охлаждения при условиях: температура окружающей среды 22–25 °С, относительная влажность 40–50 %, отсутствие ветра – показали, что продолжительность охлаждения до требуемой температуры составляет порядка 9 000 с (150 мин или 2,5 ч). Эти данные сопоставимы с результатами математического моделирования [9].

Эксперименты с применением вынужденной конвекции продемонстрировали, что в этом случае время охлаждения сокращается [10]. Среднее время охлаждения при использовании ВТ сократилось на 35 %. Также были зафиксированы максимальные температурные градиенты в сечении рельса, которые не превышают 5 °С/мм, что указывает на равномерное остывание материала.

На рис. 2 представлены графики зависимости температуры рельса от времени при

вынужденной конвекции: кривые «Замер 1–5» представляют собой экспериментальные данные, полученные при охлаждении с применением вихревой трубки и водяной форсунки. Линии «Калькулятор МКР» и «SolidWorks» демонстрируют результаты математического моделирования.

При решении задачи в SolidWorks использован метод конечных разностей для трехмерного численного решения уравнения теплопроводности, что позволяет учесть сложную геометрию рельса и пространственное распределение температуры. Для вынужденной конвекции использован коэффициент теплоотдачи 500 Вт/м²·К.

«Калькулятор МКР» (математическое моделирование кинетики охлаждения) – авторская численная модель (на основе метода конечных разностей) для оценки кинетики охлаждения тела, аппроксимированного простым геометрическим объектом, которая использовалась для экспресс-оценки. Более подробное описание авторского ПО приведено в работе [9].

Результаты экспериментальных и имитационных исследований представлены на рис. 2:

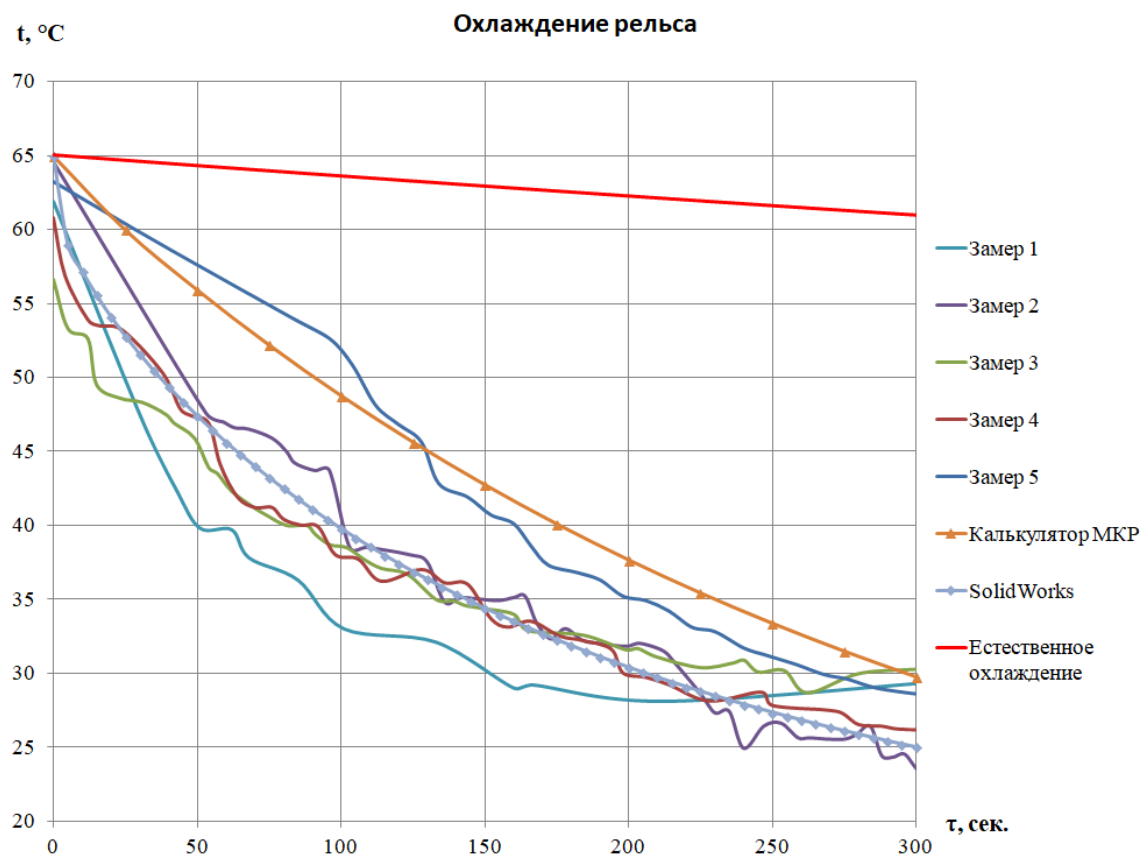


Рис. 2. Результаты экспериментальных и имитационных исследований

- кривые «Замер 1–5» демонстрируют крутой спад температуры в начальный период и достижение целевой температуры ($\sim 30^\circ\text{C}$) за 250–300 с;

- кривые «Калькулятор МКР» и «SolidWorks» отображают результаты математического моделирования процесса охлаждения при вынужденной конвекции с коэффициентом теплоотдачи $\alpha = 500 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$. Как видно из графика, результаты моделирования (особенно в SolidWorks) хорошо согласуются с экспериментальными данными по вынужденной конвекции, подтверждая адекватность использованной модели. Начальный участок экспериментальной кривой характеризуется более интенсивным охлаждением, что может быть связано с особенностями начального теплового удара и распределения потока.

При естественной конвекции рельса температурные градиенты варьируются в диапазоне от 0,5 до $3^\circ\text{C}/\text{мм}$ в зависимости от воздействия внешних факторов, а именно: солнечного излучения, ветра и поверхностей, доступных для естественной конвекции (в основном низ подошвы в меньшей степени подвержен данному эффекту). При очень медленном и равномерном охлаждении этот градиент близится к нижней границе.

Как видно из графиков, применение вынужденной конвекции обеспечивает значительно более быстрое снижение температуры рельса по сравнению с охлаждением в естественных условиях, при котором температурная кривая имеет приближенно линейный характер [9].

Интерес представляет такой параметр, как время охлаждения до требуемой температуры рельса, а также существенный качественный признак, показывающий эффективность охлаждения, на который необходимо обращать внимание для избегания высоких перепадов температур, – равномерность охлаждения сечения рельса.

Анализ полученных экспериментальных данных позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Применение вынужденной конвекции позволило сократить среднее время охлаждения рельса от 65°C до целевой температуры 30°C **на 95 %** по сравнению с естественным охлаждением.

2. Метод способствовал равномерному охлаждению сечения рельса. Максимальные зафиксированные температурные градиенты не превышали $5^\circ\text{C}/\text{мм}$, что существенно снижает риск возникновения остаточных напряжений и деформаций. Для естественного охлаждения градиенты варьировались в диапазоне от 0,5 до $3^\circ\text{C}/\text{мм}$.

3. Результаты математического моделирования в SolidWorks показали хорошее согласование с экспериментальными данными по вынужденной конвекции, что подтверждает адекватность использованной расчетной модели.

Экономические аспекты (затраты, окупаемость) требуют проведения дополнительных комплексных исследований (долгосрочного мониторинга напряжений, износа; расчетов энергозатрат и стоимости внедрения).

Графики зависимости температуры от времени наглядно демонстрируют более крутой спад температуры при использовании комбинированного метода по сравнению с практически линейным характером охлаждения в естественных условиях.

Выводы

Таким образом, экспериментально подтверждена эффективность вынужденной конвекции воздуха, генерируемого вихревой трубкой и водяной форсункой, для ускорения процесса охлаждения рельса Р65 до температуры закрепления ($\sim 30^\circ\text{C}$) и снижения температурных градиентов в его сечении.

На основании проведенных экспериментальных и теоретических исследований можно сделать следующие выводы:

1. Разработанный комбинированный метод охлаждения с использованием вихревой трубки и водяного распыления является высокоэффективным и позволяет значительно ускорить процесс достижения рельсом температуры закрепления.

2. Метод обеспечивает равномерное распределение температуры по сечению рельса, минимизируя опасные температурные градиенты, что повышает долговечность и надежность рельсовой плети после ремонта.

3. Результаты математического моделирования подтвердили адекватность выбранной модели и возможность ее использования для прогнозирования кинетики охлаждения.

Перспективы дальнейших исследований связаны с оптимизацией параметров установки (расхода, геометрии подачи), масштабированием технологии на участки рельсовой

плети значительной длины и проведением комплексной экономической оценки эффективности внедрения метода в условиях путевого хозяйства.

Список источников

1. Технические указания по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути. Москва : ОАО «РЖД», 2012. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200069932> (дата обращения: 24.09.2024).
2. Азаров А. И. Вихревые трубы нового поколения // Конструктор. Машиностроитель. 2007. № 3. С. 18–24.
3. Лыков А. В. Теория теплопроводности. Москва : Высшая школа, 1967. 600 с.
4. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. Москва : Энергоиздат, 1981. 416 с.
5. Пиралишвили Ш. А., Поляев В. М., Сергеев М. Н. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения. Москва : УНПЦ «Энергомаш», 2000. 415 с.
6. Кузнецов В. И. Теория и расчет эффекта Ранка. Омск : ОмГТУ, 1994. 217 с.
7. Носков А. С., Ловцов А. В., Хаит А. В. Математическое моделирование эффекта энергоразделения Ранка – Хильша с целью увеличения энергетических характеристик вихревой трубы // Омский научный вестник. 2011. № 3 (103). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematiceskoe-modelirovanie-effekta-energorazdeleniya-rankahilsha-tselyu-uvlicheniya-energeticheskikh-harakteristik-vihrevoy> (дата обращения: 24.09.2024).
8. Суслев А. Д., Иванов С. В., Мурашкин А. В. Вихревые аппараты. Москва : Машиностроение, 1985. 250 с.
9. Нейман В. А., Воронцов Д. С. Моделирование процесса охлаждения рельсовой плети при естественных условиях // Вестник Белгородского государственного технологического университета имени В. Г. Шухова. 2024. № 5. С. 108–117. DOI 10.34031/2071-7318-2024-9-5-108-117. EDN VXKGAI.
10. Полевой Е. В., Темлянцева М. В., Сюсюкин А. Ю. Определение скорости охлаждения по сечению головки железнодорожных рельсов при термической обработке воздухом // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2016. Т. 59, № 8. С. 543–546. DOI 10.17073/0368-0797-2016-8-543-546. EDN WJBYML.

References

1. Technical guidelines for the arrangement, laying, maintenance and repair of continuous welded rail track. Moscow: Russian Railways; 2012. (In Russ.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200069932>.
2. Azarov A. I. New generation vortex tubes. *Constructor. Mechanical Engineer*. 2007;(3):18–24. (In Russ.).
3. Lykov A. V. Theory of heat conduction. Moscow: Vysshaya Shkola; 1967. 600 p. (In Russ.).
4. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. Heat transfer. Moscow: Energoizdat; 1981. 416 p. (In Russ.).
5. Pirilishvili Sh. A., Polyayev V. M., Sergeev M. N. Vortex effect: experiment, theory, technical solutions. Moscow: UNPC 'Energomash'; 2000. 415 p. (In Russ.).
6. Kuznetsov V. I. Theory and calculation of the Rank effect. Omsk: Omsk State Technical University; 1994. 217 p. (In Russ.).
7. Noskov A. S., Lovtsov A. V., Khait A. V. Mathematical modeling of the Rank–Hilsh energy separation effect to improve energy characteristics of a vortex tube. *Omsk Scientific Bulletin*. 2011;(103). (In Russ.). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematiceskoe-modelirovanie-effekta-energorazdeleniya-rankahilsha-s-tselyu-uvlicheniya-energeticheskikh-harakteristik-vihrevoy>.
8. Suslov A. D., Ivanov S. V., Murashkin A. V. Vortex devices. Moscow: Mashinostroyeniye; 1985. 250 p. (In Russ.).
9. Neiman V. A., Vorontsov D. S. Modeling the process of rail cooling under natural conditions. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*. 2024;(5):108–117. (In Russ.). DOI 10.34031/2071-7318-2024-9-5-108-117.
10. Polevoy E. V., Temlyantsev M. V., Syusyukin A. Yu. Determination of the cooling rate by the cross section of the head of railway rails during heat treatment with air. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Ferrous Metallurgy*. 2016;59(8):543–546. (In Russ.). DOI 10.17073/0368-0797-2016-8-543-546.

Информация об авторах

В. А. Нейман – аспирант кафедры «Подъемно-транспортные, путевые, строительные и дорожные машины» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Д. С. Воронцов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Подъемно-транспортные, путевые, строительные и дорожные машины» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

V. A. Neyman – Postgraduate of the Lifting, Transport, Track, Construction and Road Machinery Department, Siberian Transport University.

D. S. Vorontsov – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Lifting, Transport, Track, Construction and Road Machinery Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 03.07.2025; одобрена после рецензирования 29.09.2025; принята к публикации 09.10.2025.

The article was submitted 03.07.2025; approved after reviewing 29.09.2025; accepted for publication 09.10.2025.

Научная статья

УДК 625.151

doi:10.52170/1815-9265_2025_77_21

Техническое состояние стрелочных переводов в сложных эксплуатационных и сезонных климатических условиях Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры

Александр Александрович Севостьянов^{1✉}, Дмитрий Валерьевич Величко²,
Илья Константинович Ардышев³, Виктор Александрович Тархов⁴

^{1, 2, 3, 4} Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

¹ seva2233@yandex.ru✉

² vdv.nsk@mail.ru

³ ardyshev.ilya@ya.ru

⁴ tarhovvictory@yandex.ru

Аннотация. Стрелочный перевод является одним из важнейших элементов железнодорожного пути, отвечает за безопасность и бесперебойность движения поездов. Статистика Западно-Сибирской железной дороги с 2019 г. показывает тенденцию к снижению отказов технических средств, в то время как количество отказов стрелочных переводов существенно возросло, и к началу 2025 г. практически половина отказов приходится на данный элемент. В рамках реализации научно-исследовательской работы «Продление нормативного срока службы стрелочных переводов, эксплуатирующихся в суровых климатических условиях» был проведен анализ отказов стрелочных переводов, эксплуатация которых осуществляется в условиях Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры с 2018 по 2024 г.

В статье приведен краткий обзор исследований отечественных ученых в области продления нормативного срока службы стрелочных переводов. Описано распределение отказов стрелочных переводов по причинам и месяцам. Выявлено, что около 70 % отказов связано с нарушением норм содержания стрелочного перевода, в частности отставанием остряка от рамного рельса на 4 мм и более, нарушениями критических расстояний в зоне крестовины, отклонениями в содержании переводной кривой по ординатам. Представлено распределение отказов по дефектности металлических частей стрелочного перевода за рассматриваемый период с указанием наиболее распространенных дефектов, выявленных на стрелочных переводах Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры. Среди дефектов металлических элементов стрелочного перевода преобладают отслоение и выкрашивание сердечника и усювиков крестовины. Наибольшая частота отказов по указанным причинам наблюдается весной (март – май) и в период с конца лета до середины осени (август – сентябрь). Существенный прирост отказов по нарушению норм содержания стрелочных переводов произошел с 2021 по 2023 г. Результаты исследования могут быть использованы для оптимизации эксплуатации и обслуживания стрелочных переводов в сложных климатических условиях.

Ключевые слова: железнодорожный путь, стрелочный перевод, отказ, геометрия рельсовой колеи, текущее содержание

Для цитирования: Техническое состояние стрелочных переводов в сложных эксплуатационных и сезонных климатических условиях Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры / А. А. Севостьянов, Д. В. Величко, И. К. Ардышев, В. А. Тархов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 5 (77). С. 21–29. DOI 10.52170/1815-9265_2025_77_21.

Original article

The technical condition of the track switches in difficult operational and seasonal climatic conditions of the West Siberian Infrastructure Directorate

Alexander A. Sevostyanov^{1✉}, Dmitry V. Velichko², Ilya K. Ardyshev³, Viktor A. Tarkhov⁴

^{1, 2, 3, 4} Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

¹ seva2233@yandex.ru✉

² vdv.nsk@mail.ru

³ ardyshev.ilya@ya.ru

⁴ tarhovvictory@yandex.ru

Abstract. The track switch is one of the most critical elements of railway track infrastructure, ensuring safe and uninterrupted train operations. The statistics of the West Siberian Railway since 2019 show a downward trend in failures of technical equipment, while the number of track switch failures has increased significantly, and by the beginning of 2025, almost half of the failures are accounted for by this element. As part of the implementation of

the research work 'Extending the standard service life of track switches operated in harsh climatic conditions', an analysis of failures of track switches operated in the conditions of the West Siberian Directorate of Infrastructure for the period from 2018 to 2024 was carried out.

The article highlights the research of domestic scientists in the field of track switches standard service life prolongation. The distribution of switch failures by reasons and months is described. It was revealed that about 70 % of failures are associated with violations of the norms of the transfer rate, in particular: the lag of the wit from the frame rail by 4 mm or more, violations of critical distances in the area of the crosspiece, deviations in the content of the transfer curve in ordinates. The distribution of failures by defective metal parts of the switchboard for the period under review is presented, indicating the most common defects identified on the switches of the West Siberian Directorate of Infrastructure. Among the defects in the metal elements of the switch, peeling and discoloration of the core and guardrails of the crosspiece prevail. The highest frequency of failures for these reasons is observed in spring (March – May) and in the period from late summer to mid-autumn (August – September). A significant increase in refusals for violations of the standards for the maintenance of switches occurred in the period from 2021 to 2023. The research findings can optimize switch maintenance and operation practices in challenging climatic conditions.

Keywords: railway track, track switch, failure, track geometry, track maintenance

For citation: Sevostyanov A. A., Velichko D. V., Ardyshev I. K., Tarkhov V. A. The technical condition of the track switches in difficult operational and seasonal climatic conditions of the West Siberian Infrastructure Directorate. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(77):21–29. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_77_21.

Введение

В рамках обеспечения безопасного и бесперебойного движения поездов перед работниками дирекции инфраструктуры стоит широкий перечень задач. Одним из основных объектов инфраструктуры является стрелочный перевод, техническое состояние которого напрямую влияет на безопасность движения поездов. К наиболее распространенным стрелочным переводам на главных путях ОАО «РЖД» относятся стрелочный перевод марки 1/11 проекта 2750. В условиях политики увеличения межремонтного срока железнодорожного пути именно стрелочные переводы выступают узким местом; в частности, при ремонтной схеме, обеспечивающей пропущенный тоннаж до 1,4 млрд т брутто и более, предусматривается плановая замена ремкомплектов и крестовин [1], но на практике необходимость замены элементов встречается чаще.

Продление межремонтного срока стрелочного перевода является актуальным направлением, которым заняты как зарубежные [2, 3], так и отечественные [1, 4–6] ученые. Один из ведущих ученых в области железнодорожного пути и стрелочного хозяйства Б. Э. Глюзберг в своих исследованиях [7, 8] подчеркивает необходимость увеличения частоты контроля за состоянием стрелочных переводов при обращении тяжелых поездов, так же как и профилактических работ. Отмечается, что при наличии тяжеловесного движения происходит сокращение срока службы элементов стрелочного перевода на 15–25 % [8]. Безусловно, рост осевых нагрузок сокращает срок службы элементов стрелочного перевода.

В своих исследованиях П. В. Трегубчак указывает на основные дефекты элементов стрелочного перевода, в том числе для условий Западно-Сибирской железной дороги, предлагая осуществлять повышение ресурса крестовин за счет упрочнения энергией взрывной волны [1, 9–11]. Также представлены результаты исследования по совершенствованию конструкции моноблочных крестовин на основе численного моделирования, эксплуатационных наблюдений и расчетов экономической эффективности [1]. С 2024 г. на сети ОАО «РЖД» осуществляется наращивание поставок стрелочных переводов Н01.004, которые должны снизить расходы на текущее содержание крестовин по всей инфраструктуре [1].

Вместе с тем стоит помнить, что на безотказную работу стрелочного перевода влияет также обеспечение эксплуатации его элементов, отвечающей нормативным требованиям, что в условиях Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры достаточно актуально.

Материалы и методы исследования

Представленные результаты исследования получены в рамках реализации научно-исследовательской работы «Продление нормативного срока службы стрелочных переводов, эксплуатирующихся в суровых климатических условиях». Для анализа технического состояния стрелочных переводов, уложенных в условиях Западно-Сибирской железной дороги, были изучены материалы отказов технических средств за период с 2018 по 2024 г. (рис. 1).

Для дальнейшего анализа причин отказов стрелочных переводов использовалась стати-

стика отказов 3-й категории по причине их массовости. Анализ производился как отдельно по причинам отказов, с подразделением причин на отдельные блоки (дефектность металлических частей, нарушения норм содержания), так и по месяцам.

Результаты исследования

В ходе анализа отказов технических средств 3-й категории было выявлено, что в последние годы происходит планомерное снижение общего числа отказов. В 2024 г. общее число отказов сократилось на 36 % по сравнению с 2018 г. Вместе с этим количество отказов на стрелочных переводах ежегодно росло и к 2024 г. увеличилось в два раза, а соответственно, увеличилась доля отказов на стрелочных переводах (с 14 % в 2019 г. до 45 % в 2024 г.). Таким образом, практически половина отказов на структурных подразделениях службы пути приходится на стрелочные переводы. Повышенная динамика отказов негативно сказывается на сроке службы стрелочного перевода. Если же рассматривать причины отказов (рис. 2), то на де-

фектность металлических частей стрелочных переводов приходится в среднем 30 % (максимальное значение достигалось в 2020 г. – 38 %, минимальное в 2018 г. – 23 %). Основная доля отказов связана с нарушением норм содержания стрелочных переводов (в среднем 67 %).

Подробное процентное соотношение причин отказов представлено на рис. 3, статистика дефектности металлических частей стрелочного перевода – в табл. 1. В табл. 2 приведена динамика изменения количества наиболее часто возникающих отказов среди нарушения норм содержания за рассматриваемый период.

Рисунок 4 показывает, что среди нарушений норм содержания стрелочных переводов наиболее частым случаем (34 %) является отставание остряка от рамного рельса на 4 мм и более. Данный отказ является следствием ряда причин: износа металлических элементов (остряка, рамного рельса, ослабления креплений) или их деформаций (искривления остряка), а также низкого качества текущего содержания (нарушения геометрии рельсовой колеи, недостаточной смазки в зоне башмаков).

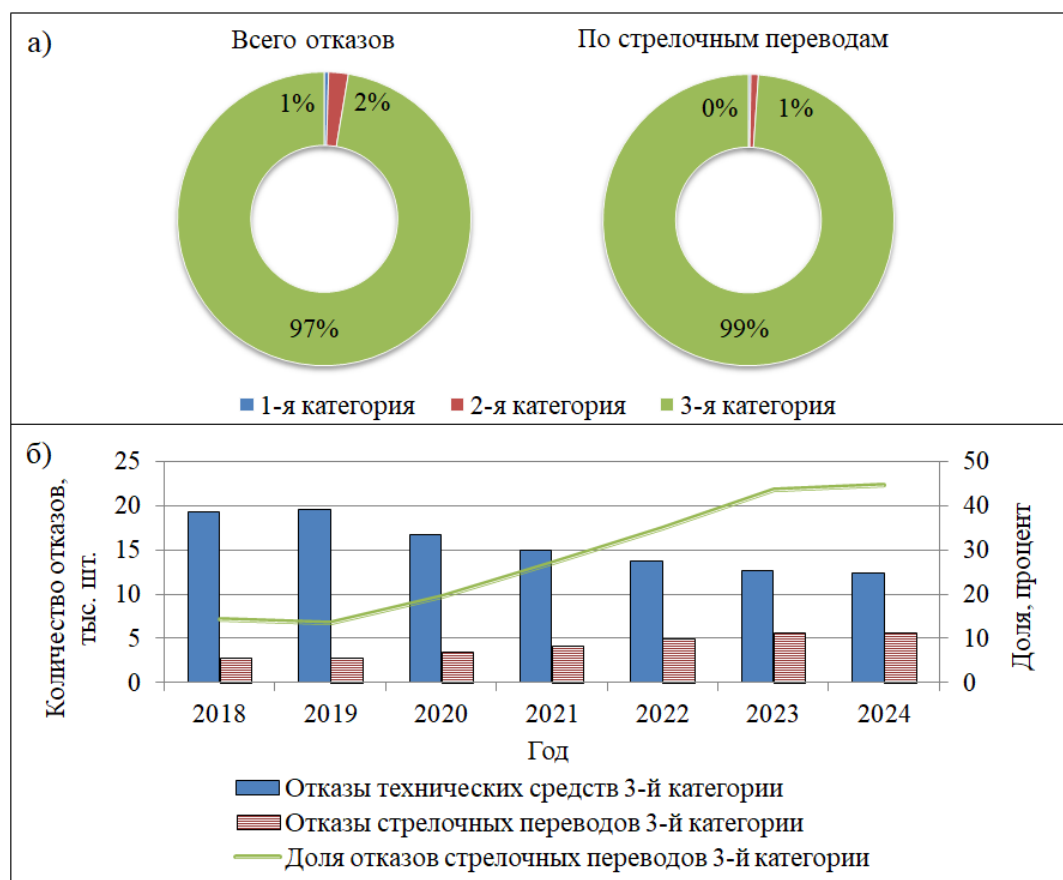


Рис. 1. Статистика отказов технических средств Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры: а – по категории отказа; б – доля отказов 3-й категории по причине неисправности стрелочных переводов

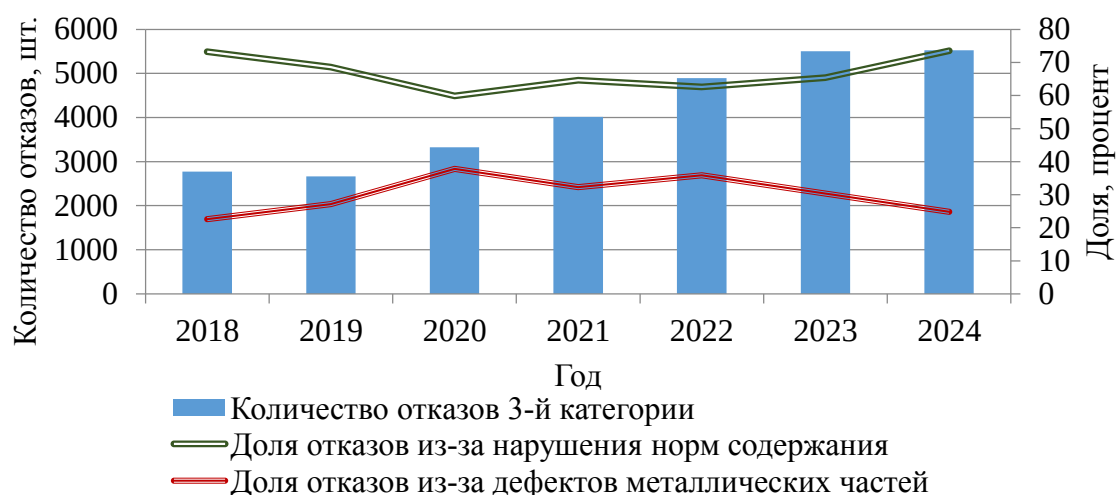


Рис. 2. Распределение отказов технических средств 3-й категории по основным причинам

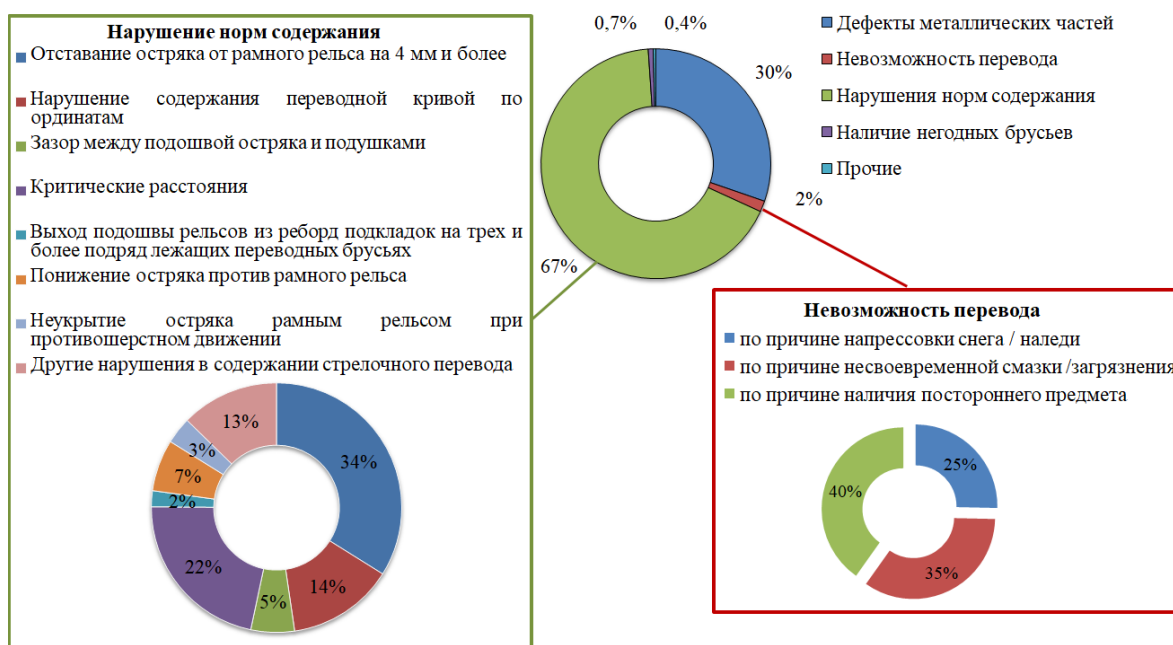


Рис. 3. Основные причины отказов на стрелочных переводах

Среди дефектностей металлических частей стрелочного перевода на неприлегание остряков к рамному рельсу, к подушкам подкладок из-за саморазгиба, вертикального выгиба и пропеллерности (ДО.80) приходится 3 % отказов (см. табл. 1). Также к проблемам, возникающим из-за нарушения норм содержания остряков, можно отнести отказы по зазорам между подошвой остряка и подушками (5 % от всех отказов по нормам содержания), понижение остряка против рамного рельса (7 %) и неукрытие остряка рамным рельсом при противошерстном движении (3 %). В целом с учетом дефектности на остряки приходится 43 % от всех отказов, в том числе 23 % по отставанию остряков.

Стоит отметить высокую долю отказов, связанных с критическими расстояниями в крестовине, на данную причину приходится 15 % от всех зарегистрированных отказов. Причем, согласно статистике, 90 % случаев составляют нарушения требования к расстоянию между рабочей гранью сердечника крестовины и рабочей гранью головки контрельса (не менее 1 472 мм). Если обратиться к практике, подобное распределение объясняется особенностью промера критических расстояний. Также существенная доля отказов приходится на нарушения норм содержания переводной кривой по ординатам (9 % от всех отказов).

Таблица 1

**Количество отказов 3-й категории по причине дефектности
металлических частей стрелочного перевода, шт.**

Элемент и наиболее распространенная причина отказа	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Всего
Остряк	112	95	157	219	469	302	236	1 590
ДО.11.2	33	39	91	112	275	119	90	759
ДО.14.2	24	31	37	92	114	113	86	497
Рамный рельс	106	119	159	188	179	152	112	1 015
ДР.11.2	3	42	68	82	76	74	41	383
ДР.21.2	51	70	84	62	93	53	49	411
Сердечник	258	354	677	672	757	644	470	3 832
ДС.14.2	92	102	267	468	568	523	356	2376
ДС.13.2	23	84	90	25	26	12	7	267
ДС.18.2	24	27	71	57	50	29	16	274
ДС.28.2	11	7	49	16	17	7	26	133
ДС.30Г.2	47	35	36	25	26	18	13	200
Усовик	125	128	230	194	325	542	520	2 064
ДУ.12.2	17	17	29	47	57	84	118	369
ДУ.13.2	11	13	19	9	15	7	50	124
ДУ.14.2	62	60	142	103	180	293	159	999
ДУ.18.2	12	8	13	7	24	47	24	135
ДУ.11.2	9	7	7	14	31	59	79	206
Зона контррельса	26	27	35	24	26	31	32	201
ДК.14.2	4	13	13	7	5	7	16	65
ДК.54	8	1	4	3	3	8	5	31
ДК.41.2	1	1	5	4	8	8	3	29
ДХ.44.2	6	11	11	7	5	5	5	50

Таблица 2

Количество отказов 3-й категории по нарушениям норм содержания, шт.

Вид нарушения	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Отставание остряка от рамного рельса на 4 мм и более	680	592	660	918	1 247	1 263	1 172
Нарушение содержания переводной кривой по ординатам	341	291	216	364	343	542	562
Критические расстояния в зоне крестовины	388	319	440	555	628	879	990

В табл. 1 подробно представлено распределение отказов по дефектности металлических частей стрелочного перевода за рассматриваемый период с указанием наиболее распространенных дефектов, выявленных на стрелочных переводах Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры. Как видно из таблицы, почти 70 % отказов приходится на крестовину, в частности, наиболее распространенной причиной (57 % от всех отказов крестовины) является отслоение и выкрашивание сердечника (усовика) из-за повышенного динамического воздействия (ДС.14.2 и ДУ.14.2). Существенный рост отказов по данной причине начался с 2020 г. и достиг пиковых значений (568 шт.) в 2022 г. За 2024 г. зафиксировано снижение отказов по данной причине – 356 шт., что в 3,5 раза выше значений

за 2018 и 2019 гг. Если обратиться к практической части высокой динамики данных отказов, то в основе лежит несвоевременная шлифовка крестовины.

В процессе эксплуатации образуется локальное утолщение металла (наплыв), что связано с пластической деформацией металла и воздействием высоких динамических нагрузок, в том числе от тяжеловесных поездов. В сердечнике образуется своего рода грибообразный наплыв, который нужно своевременно шлифовать, в случае усовиков происходит их закатывание, что также является пластической деформацией и требует шлифовки.

При отсутствии своевременной шлифовки имеет место отслоение и выкрашивания металла (рис. 4). Также стоит учитывать и интен-



Рис. 4. Примеры выкрашивания сердечника и усовика крестовины

сивный рост объема тяжеловесных поездов в последние годы, негативное воздействие которых отмечают ученые [4, 5, 7, 12, 13]. Опыт Каменской дистанции пути показывает, что своевременное шлифование позволяет повысить срок службы практически вдвое [14].

Если же рассматривать динамику нарастания отказов по причине дефектности металлических частей стрелочного перевода (см. табл. 2), то основной прирост отказов по крестовине произошел в 2020 г. (увеличение количества отказов практически в два раза). Причем в дальнейшем отказы сердечника находились на том же уровне (в среднем 650 отказов в год), а динамика отказов усовика ежегодно росла и к 2024 г. составила 520 отказов, что выше уровня 2019 г. в четыре раза.

Исходя из анализа статистики отказов можно отметить тревожную динамику нарастания отказов по нарушению норм содержания, в частности по отставанию остряка от рамного рельса и нарушению требований к критическим расстояниям (см. табл. 2).

Если количество отказов в случае отставания остряка в 2024 г. увеличилось по сравнению с 2019 г. в два раза, то отказов по критическим расстояниям – в три раза. Таким образом, ежегодно на каждом 10-м стрелочном переводе Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры происходят данные отказы.

Распределение наиболее частых отказов по месяцам (рис. 5) показывает, что по дефектности металлических частей наиболее проблемными являются весенние месяцы и переход из лета в осень, что в большей степени связано с отслоением и выкрашиванием сердечника и усовика крестовины.

Аналогичная ситуация просматривается и в случае отказов по отставанию остряка, критических расстояний и нарушений по ординатам: наибольшая доля отказов приходится на весну (апрель и май) и конец лета – начало осени (август, сентябрь).

Логично, что для сокращения данных отказов необходимо повысить контроль соответствующих элементов и своевременность устра-

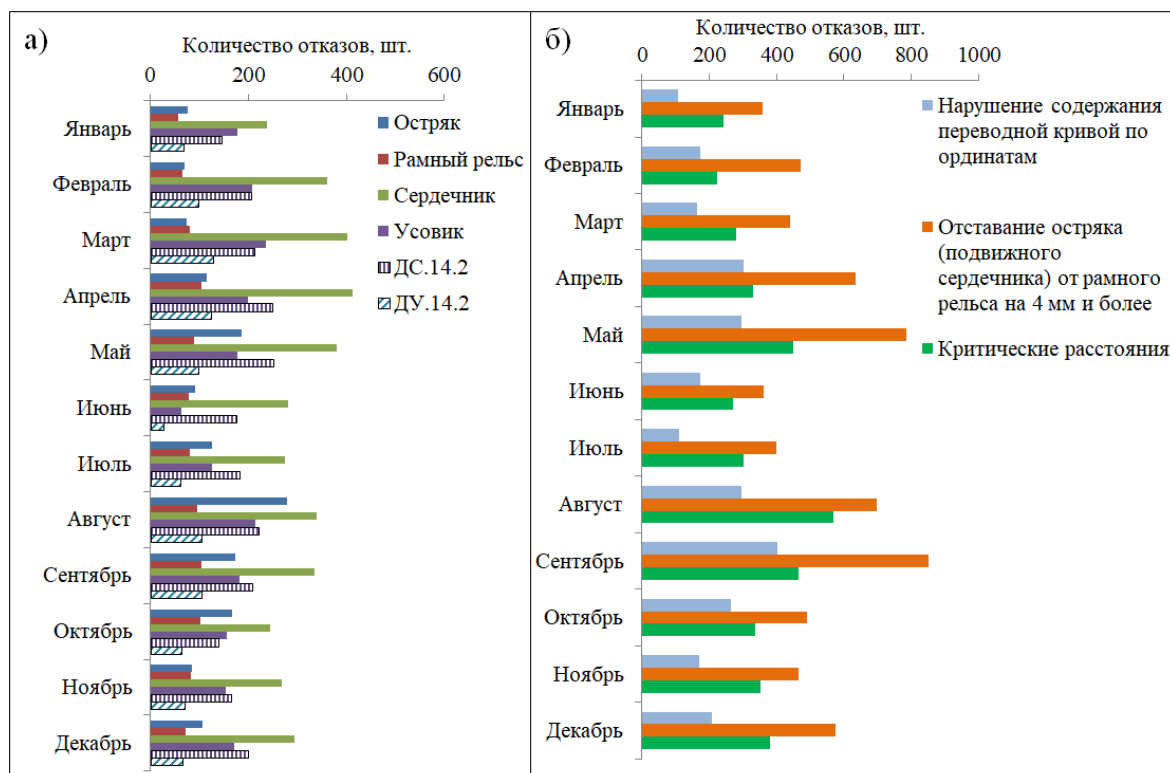


Рис. 5. Распределение основных причин отказов 3-й категории на стрелочных переводах по месяцам с 2018 по 2024 г.:

а – дефектность металлических частей; *б* – нарушение норм содержания

нения отклонений в плановом порядке. Работы по «перешивке ординат», равно как и работы по регулировке остряка или критических расстояний, являются достаточно трудоемкими. Вместе с тем руководитель работ должен обладать существенным опытом ввиду сложности работ и жесткости требований по допуску. В настоящее время, ввиду дефицита кадров, данная проблема проявляется особенно сильно.

Решение описанных выше проблем позволит снизить частоту отказов стрелочных переводов, что благоприятно скажется на сроке службы стрелочных переводов.

Выводы

По итогам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. В последние годы на Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры при снижении общего числа отказов 3-й категории наблюдается рост отказов на стрелочных переводах: за последние пять лет количество отказов увеличилось в два раза. Практически 70 % отказов приходится на нарушения норм содержания стрелочных переводов. Наиболее частыми причи-

нами отказов являются отставание остряка от рамного рельса на 4 мм и более, нарушение норм содержания критических расстояний в зоне крестовины и переводной кривой по ординатам, а также выкрашивание сердечника и усовиков крестовины. Данные отказы в большей степени происходят весной (в марте – мае) и осенью (в августе, сентябре).

2. Для борьбы с данными отказами необходимо усилить контроль и наблюдение за соответствующими элементами, а также осуществлять плановые работы, направленные на сокращение вероятности отказов. С целью борьбы с выкрашиванием крестовины необходимо своевременно осуществлять шлифовку сердечника и усовиков исходя из анализа динамики формирования наплывов. План шлифовки крестовин необходимо привязать либо к нарастанию наката и заявкам от дорожных мастеров, либо к величине пропущенного тоннажа на основе исследований, учитывающих грузонапряженность и характерные особенности, в которых эксплуатируются стрелочные переводы. Для борьбы с наиболее частыми отказами по нару-

шению норм содержания необходимо своевременно проводить соответствующие работы в плановом порядке, что является проблемой в настоящее время ввиду дефицита кадров. Систематизация контроля и своевременности планово-предупредительных работ по обеспечению надежной работы элементов стрелочного перевода позволит повысить срок службы стрелочных переводов и сократить расходы, связанные с отказом его элементов.

Дальнейшие исследования авторы планируют сосредоточить на выявлении взаимосвязей рассмотренных причин отказа технических средств и ряда параметров (пропущенного тоннажа, грузонапряженности и прочих условий эксплуатации), с разработкой оптимального плана шлифовки крестовин. Также намечено численное моделирование влияния подрельсового основания на динамическое воздействие поездов в элементах стрелочного перевода.

Список источников

1. Трегубчак П. В. Разработка крестовин стрелочных переводов для условий тяжеловесного и интенсивного движения : специальность 2.9.2 «Железнодорожный путь, изыскания и проектирование железных дорог» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Трегубчак Павел Владимирович. Москва, 2024. 150 с.
2. Vitásek S., Měšťanová D. Life Cycle Cost of a Railroad Switch // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 196. P. 646–652. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.053>.
3. Litherland J., Andrews J. A reliability study of railway switch and crossing components // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F. Journal of Rail and Rapid Transit*. 2023. Vol. 237, Iss. 2. P. 205–217. <https://doi.org/10.1177/09544097221100672>.
4. Стрелочные переводы типа Р65 марки 1/11 в условиях обращения поездов повышенной массы и длины / М. И. Титаренко, Б. Э. Глюзберг, П. В. Трегубчак, С. В. Кузнецов // *Путь и путевое хозяйство*. 2024. № 12. С. 7–10.
5. Глюзберг Б. Э., Титаренко М. И. Обеспечение надежной работы стрелочного хозяйства в условиях повышенных нагрузок // *Путь и путевое хозяйство*. 2024. № 6. С. 23–25.
6. Karpushchenko N., Komardinkin R. Lifecycle cost evaluation of turnouts on a reinforced concrete base for especially heavy-duty track sections // *E3S Web of Conferences, Saint Petersburg, September 19–21, 2023. Saint Petersburg : EDP Sciences, 2023. Vol. 460. P. 06017. DOI 10.1051/e3sconf/202346006017*.
7. Глюзберг Б. Э. Стрелочные переводы для обеспечения тяжеловесного движения поездов // II Международная научная конференция «Железная дорога: путь в будущее» : сборник материалов аспирантов и молодых ученых к 80-летию аспирантуры и научного центра «Экономика комплексных проектов и тарифообразования» АО «ВНИИЖТ», Москва, 18 апреля 2024 года. Москва : Инфра-М, 2024. С. 497–502.
8. Глюзберг Б. Э., Титаренко М. И., Трегубчак П. В. Обеспечение перевозочного процесса при нагрузках на стрелочные переводы, превышающих проектные и нормативные критерии // *Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта*. 2024. Т. 83, № 3. С. 205–214.
9. Трегубчак П. В. Проектирование конструкции моноблочных крестовин для тяжелых условий эксплуатации // *Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта*. 2023. Т. 82, № 2. С. 146–156.
10. Трегубчак П. В., Березовский М. Е. Повышение ресурса крестовин стрелочных переводов в современных условиях // *Транспортное строительство : сборник статей Четвертой Всероссийской научно-технической конференции*, Москва, 12–14 апреля 2023 года. Москва : Перо, 2023. С. 147–153.
11. Трегубчак П. В. Повышение ресурса крестовин за счет упрочнения энергией взрывной волны на АО «Новосибирский стрелочный завод» // II Международная научная конференция «Железная дорога: путь в будущее» : сборник материалов аспирантов и молодых ученых к 80-летию аспирантуры и научного центра «Экономика комплексных проектов и тарифообразования» АО «ВНИИЖТ», Москва, 18 апреля 2024 года. Москва : Инфра-М, 2024. С. 523–528.
12. Севостьянов А. А., Кочетков А. С., Стрелков Д. С. Анализ воздействия поездов на железнодорожный путь в условиях Среднесибирского хода // *Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения*. 2020. № 4 (55). С. 26–33.
13. Деформативность пути на участках обращения тяжеловесных поездов / В. О. Певзнер, А. И. Лисицын, Е. Н. Гринь [и др.] // *Железнодорожный транспорт*. 2019. № 9. С. 36–41.
14. Бобкова О. Срок службы элементов стрелочного перевода увеличили вдвое // *Гудок* : [сайт] 2024. 29 марта. № 10. URL: <https://gudok.ru/zdr/180/?ID=1663451> (дата обращения: 28.07.2025).

References

1. Tregubchak P. V. Development of switch crosspieces for heavy and heavy traffic conditions: specialty 2.9.2 Railway track, survey and design of railways. Dissertation for the degree of Candidate of Engineering. Tregubchak Pavel Vladimirovich. Moscow; 2024. 150 p. (In Russ.).
2. Vitásek S., Měšťanová D. Life Cycle Cost of a Railroad Switch. *Procedia Engineering*. 2017;196:646–652. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.053>.
3. Litherland J., Andrews J. A reliability study of railway switch and crossing components. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F. Journal of Rail and Rapid Transit*. 2023;237(2):205–217. <https://doi.org/10.1177/09544097221100672>.
4. Titarenko M. I., Gluzberg B. E., Tregubchak P. V., Kuznetsov S. V. P65 type switches of the 1/11 mark in the conditions of handling trains of increased mass and length. *Track and Track Facilities*. 2024;(12):7–10. (In Russ.).
5. Gluzberg B. E., Titarenko M. I. Ensuring reliable operation of a switchboard in conditions of increased loads. *Track and Track Facilities*. 2024;(6):23–25. (In Russ.).
6. Karpushchenko N., Komardinkin R. Lifecycle cost evaluation of turnouts on a re-enforced concrete base for especially heavy-duty track sections. *E3S Web of Conferences, Saint Petersburg, September 19–21, 2023*. Saint Petersburg: EDP Sciences; 2023. Vol. 460. P. 06017. DOI 10.1051/e3sconf/202346006017.
7. Gluzberg B. E. Switch switches to ensure heavy train traffic. *II International Scientific Conference. Railway: the Way to the Future. Proceedings of Aspirants and Young Scientists Dedicated to the 80th Anniversary of Postgraduate Studies and the Scientific Center 'Economics of Integrated Projects and Tariff Formation', Railway Research Institute, Moscow, April 18, 2024*. Moscow: Infra-M; 2024. P. 497–502. (In Russ.).
8. Gluzberg B. E., Titarenko M. I., Tregubchak P. V. Ensuring the transportation process under loads on switches exceeding design and regulatory criteria. *Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport*. 2024;83(3):205–214. (In Russ.).
9. Tregubchak P. V. Designing the construction of monoblock crosspieces for severe operating conditions. *Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport*. 2023;82(2):146–156. (In Russ.).
10. Tregubchak P. V., Berezovsky M. E. Increasing the resource of switch crosspieces in modern conditions. *Transport Construction. Proceedings of the Fourth All-Russian Scientific and Technical Conference, Moscow, April 12–14, 2023*. Moscow: Pero Publishing House; 2023. P. 147–153. (In Russ.).
11. Tregubchak P. V. Increasing the resource of krestovines by strengthening the blast wave energy at Novosibirsk Switch Plant JSC. *II International Scientific Conference. Railway: the Way to the Future. Proceedings for graduate students and young scientists dedicated to the 80th anniversary of the graduate school and the scientific center for Economics of Complex Projects and Tariff Formation of Railway Research Institute, Moscow, 18.04.2024*. Moscow: Scientific Publishing Center Infra-M; 2024. P. 523–528. (In Russ.).
12. Sevostyanov A. A., Kochetkov A. S., Strelkov D. S. Analysis of the impact of trains on the railway track in the conditions of the Central Siberian run. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2020;(55):26–33.
13. Pevzner V. O., Lisitsyn A. I., Grin E. N. [et al.]. Deformability of the track in the areas of circulation of heavy trains. *Railway Transport*. 2019;(9):36–41. (In Russ.).
14. Bobkova O. The service life of the switch elements has been doubled. *Gudok*: [site]. 2024. March 29. No. 10. (In Russ.). URL: <https://gudok.ru/zdr/180/?ID=1663451>.

Информация об авторах

А. А. Севостьянов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Путь и путевое хозяйство» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Д. В. Величко – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Путь и путевое хозяйство» Сибирского государственного университета путей сообщения.

И. К. Ардышев – преподаватель кафедры «Путь и путевое хозяйство» Сибирского государственного университета путей сообщения.

В. А. Тархов – преподаватель кафедры «Путь и путевое хозяйство» Сибирского государственного университета путей сообщения, инженер НИЛ «Путеиспытательная».

Information about the authors

A. A. Sevostyanov – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Track and Track Facility Department, Siberian Transport University.

D. V. Velichko – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Track and Track Facility Department, Siberian Transport University.

I. K. Ardyshev – Lecturer of the Track and Track Facility Department, Siberian Transport University.

V. A. Tarkhov – Lecturer of the Track and Track Facility Department, Siberian Transport University, Engineer of the Research Laboratory 'Puteyspytnaya'.

Статья поступила в редакцию 11.09.2025; одобрена после рецензирования 14.10.2025; принята к публикации 16.10.2025.

The article was submitted 11.09.2025; approved after reviewing 14.10.2025; accepted for publication 16.10.2025.

Научная статья
УДК 656.222.6
doi:10.52170/1815-9265_2025_77_30

Структурно-функциональный подход к развитию пропускной способности железнодорожных полигонов

Николай Андреевич Тушин¹, Инна Геннадьевна Слободянюк²,
Полина Евгеньевна Раевская³, Кирилл Максимович Тимухин⁴✉

^{1, 4} Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

² Транспортно-логистическая компания «Уралконтейнер», Екатеринбург, Россия

³ Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия

¹ ntushin@zde.ru

² sig@ucont.ru

³ polina.volo@mail.ru

⁴ KTimuhin@usurt.ru✉

Аннотация. Стратегия развития транспорта в Российской Федерации особое внимание уделяет необходимости развития транспортной отрасли по различным векторам, в том числе по направлению цифровизации. Современные геополитические условия, при которых страны находятся в конкурентной борьбе, не позволяют совершать ошибки при проектировании транспортных сетей. А возросшая роль информатизации в системе принятия решений обязывает использовать информационные продукты, координируя деятельность коллективов людей, а также являясь эффективным инструментом для проверки решений и стратегического планирования при работе транспорта. Для функционирования безопасной суверенной экономики необходимо в числе прочего опережающее, а не «догоняющее» развитие транспорта. Именно имитационное моделирование является современным, перспективным подходом с широкой возможностью локализации на отечественном рынке и использованием отечественных разработок в данной отрасли.

В статье в первую очередь определены особенности научного подхода к управлению через системную ориентацию. Раскрыто структурное, функциональное и структурно-функциональное воздействие, с описанием отличительных особенностей каждого. Обоснована важность применения имитационных моделей. Кроме того, поднимаются вопросы, возникающие при расчете пропускной способности. Рассмотрен кейс адаптивного управления как демпфера, базирующегося на использовании динамических резервов, описывается оптимизация при проведении имитационных экспериментов. Также статья указывает на возможности и на необходимость имитационной экспертизы существующих проектов развития транспортной сети (на примере ИС ИМЕТРА). Приведены результаты экспериментов, позволяющие обосновать мероприятия по усилению пропускной способности железнодорожной сети. Даны рекомендации по методике планирования усиления пропускной способности полигона.

В заключение обосновывается вывод: при помощи имитационной модели можно рассчитать технологический эффект проводимых мероприятий и обосновать выбор наиболее рационального варианта усиления пропускной способности полигона.

Результаты научного исследования имеют не только теоретическое применение, как закономерное развитие транспортной науки в Российской Федерации, но и практическое. Широкое применение имитационных моделей может способствовать снижению издержек при строительстве новой транспортной инфраструктуры.

Ключевые слова: имитационное моделирование, транспорт, информационные технологии, ИМЕТРА, ИСТРА

Для цитирования: Структурно-функциональный подход к развитию пропускной способности железнодорожных полигонов / Н. А. Тушин, И. Г. Слободянюк, П. Е. Раевская, К. М. Тимухин // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 5 (77). С. 30–41. DOI 10.52170/1815-9265_2025_77_30.

Original article

Structural and functional approach to the development of railway polygon capacity

Nikolay A. Tushin¹, Inna G. Slobodyanyuk², Polina E. Raevskaya³, Kirill M. Timukhin⁴✉

^{1, 4} Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg, Russia.

² Transport and Logistics Company Uralcontainer, Yekaterinburg, Russia.

³ Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

¹ ntushin@zde.ru

² sig@ucont.ru

³ polina.volo@mail.ru

⁴ KTimuhin@usurt.ru✉

Abstract. The transport development strategy in the Russian Federation pays particular attention to the need to develop the transport industry in various directions. Among other things, digitalization plays a crucial role in the development of the transport network. The current geopolitical conditions, in which countries are engaged in competitive struggle, do not allow for mistakes in the design of transport networks. And the increased role of informatization in the decision-making system requires the use of information products. Coordinating the activities of groups of people, as well as being an effective tool for verifying decisions and strategic planning in transport operations. In particular, the functioning of a secure sovereign economy requires the proactive, rather than reactive, development of transport. Simulation modeling is a modern and promising approach with broad potential for localization in the domestic market and the use of domestic developments in this industry.

First, the article reveals the features of a scientific approach to management through a systemic orientation. It reveals the structural, functional, and structural-functional impact, with a description of the distinctive features of each. The importance of using simulation models is justified. Second, the article raises questions regarding problems in calculating throughput capacity. The article considers the case of adaptive control as a 'damper' based on the use of dynamic reserves and describes optimization during simulation experiments. Thirdly, the article draws attention to the possibilities and necessity of simulation expertise in existing transport network development projects (using the example of the IMETRA IS). The results of experiments are presented, which justify measures to increase the throughput capacity of the railway network. Recommendations are given on the methodology for planning the increase in the throughput capacity of the test site.

In conclusion, the article substantiates the conclusion that a simulation model can be used to calculate the technological effect of the measures taken and to justify the choice of the most rational option for increasing the throughput capacity of the test site.

The results of scientific research have not only theoretical application, as a natural development of transport science in the Russian Federation, but also practical application. The widespread use of simulation models can result in reduced costs for the construction of new transport infrastructure.

Keywords: simulation modeling, transport, information technology, IMETRA, ISTRA

For citation: Tushin N. A., Slobodyanyuk I. G., Raevskaya P. E., Timukhin K. M. Structural and functional approach to the development of railway polygon capacity. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(77):30–41. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_77_30.

Введение

Наука управления базируется на количественных методах. Функциональной процедурой любого научного исследования является научный метод. Применяя указанный метод для решения управленческих проблем, необходимо помнить, что организация – открытая система, состоящая из взаимосвязанных подсистем. Поэтому основной особенностью научного подхода к управлению является системная ориентация.

Полигоны включают в себя железнодорожные узлы, станции, перегоны производственные предприятия различных дирекций и служб и обладают определенными системными свойствами. Данные свойства зависят от характера взаимодействия структуры и потока, объектов структуры между собой и отдельных операций в технологическом процессе. К основным видам взаимодействия можно отнести структурное, функциональное и структурно-функциональное.

Структурное взаимодействие в транспортных системах отражает согласованность параметров элементов структуры, взаимодействующих между собой. Для обозначения элементов в статье используются понятия «канал» и «бункер». Расчетные схемы из бункеров и каналов, объединенных в дуплексы, позволяют выявлять закономерности построения рациональной структуры [1].

Потоковая структура может быть определена графом из множества дуг и узлов. Дуги – это каналы для пропуска потока. Узлы – бункеры, поглощающие и порождающие всплески потока. Множество потоков характеризуется множеством свойств потока. В данном случае свойством потока является некоторая дезорганизация, затрудняющая продвижение потока или делающая его невозможным. Множество можно охарактеризовать неритмичностью, несоответствием объема потока плановому, нарушениями плана формирования, потерей информации. Структура транспортной системы может быть построена так, чтобы суммарные затраты на содержание инфраструктуры были минимальны.

Потоковая система отличается от структуры наличием целенаправленного управления. Свойства элементов определяются реакцией на воздействие дезорганизации, т. е. управляемым, активным уменьшением последствий дезорганизации. Управление – это выбор тех или иных технологических цепочек в различных ситуациях. Оно определяет качество функционального взаимодействия.

Функциональным взаимодействием называется последовательность операций в технологическом процессе, который принято отображать в виде графика Ганта. Но в реальной работе происходит одновременное выполнение технологи-

ческих цепочек и наложение их на одни и те же элементы структуры. Занятость элементов структуры вызывает задержки в выполнении технологических операций.

Структурно-функциональным является вид взаимодействия, при котором параметры структуры могут быть адаптивно изменены управляемыми технологическими методами. Железнодорожные полигоны объединены в единое целое сложной сетевой структурой. Пропускную способность полигона нельзя считать зафиксированным параметром. На возникновение задержек в структуре в значительной степени влияет характер взаимодействия элементов. Пропускная способность функционально зависит от таких факторов, как структура потока, технология работы, диспетчерское управление. Если на управляющие воздействия накладываются внешние ограничения, это приводит к возникновению узких мест в технологии. Следовательно, потребуются значительные резервы пропускной способности. При рассмотрении полигонов потерять эффекты управления недопустимо, иначе резервы окажутся завышенными.

С точки зрения структурно-функционального подхода к усилению пропускной способности можно сформулировать вывод, что системная функция должна определять структуру системы. Функция на транспорте в самом общем виде – это пропуск потока по функциональному каналу. Поэтому полигон дороги можно определить как часть железнодорожной сети, которая обеспечивает структурную реализацию для функционального канала. Он имеет вполне определенные границы управления, а значит, и функциональные границы.

Еще одной особенностью науки управления является применение моделей. Моделирование, как правило, необходимо для решения сложных проблем управления и при невозможности проведения экспериментов на практике. Модели позволяют принимать объективные решения в ситуациях с неясными причинно-следственными связями. Главной характеристикой модели можно считать упрощение реальной ситуации. Устраняются не относящиеся к делу данные. Форма модели становится проще, что повышает способность руководителя к пониманию и разрешению проблем в реальной жизни [2].

В последнее время стало широко использоваться имитационное моделирование. Си-

стемы имитационного моделирования базируются на различных подходах. Для железнодорожного транспорта, где управление имеет жестко централизованный характер, лучше всего подходит дискретно-событийное моделирование. К имитационной системе, по результатам расчетов которой принимаются решения по важным структурным проектам, предъявляются серьезные требования, она должна:

- иметь возможность детально отображать структуру, технологические процессы, взаимодействие случайных процессов и технологическое управление;
- иметь подсистему автоматизированного формирования имитационных моделей, так как подробное описание структуры и технологии потребует очень больших массивов информации;
- предоставлять возможности для всестороннего исследования проекта;
- предусматривать оптимизирующие процедуры.

Имитационная система ИМЕТРА соответствует этим принципам [3, 4]. Она прошла государственную регистрацию (рис. 1) и используется для моделирования больших полигонов.

Пропускную способность железнодорожных объектов зачастую определяют как возможность структуры пропустить некоторые порции потока за определенный период. Например, для полигона это *«максимальное количество не связанных с технологией работы пропущенных поездов за заданный период времени»*.

Структурная пропускная способность определяется следующим образом:

$$N_s = \sum_{ij}(x_{ij}), N_s = f(S), \quad (1)$$

где N – число возможных передвижений по структуре; x_{ij} – некоторое возможное передвижение; S – структура.

Структурная пропускная способность оценивает только абстрактные возможности структуры. Пропуск поездов никак не связан с технологией. То есть это как бы некоторый датчик передвижений. Датчик генерирует передвижения таким образом, чтобы общее число их оказалось максимальным. Эта величина может иметь только познавательный интерес, получить ее в реальности нельзя. Необходимо различать абстрактно возможную и технологически реализуемую пропускную способность.



Рис. 1. Свидетельство о государственной регистрации системы ИМЕТРА

Структурно-функциональная пропускная способность определяется как

$$N_S^P = \sum_{ij} (c_{ij}^p x_{ij}^p), N_S^P = f(P, S), \quad (2)$$

где c_{ij}^p – коэффициент приведения; x_{ij}^p – передвижение по структуре, как реализация технологической операции p_{ij} ; p_{ij} – технологическая операция, задающая передвижение по маршруту ij ; P – технология.

Реальный смысл имеет только структурно-функциональная пропускная способность. Ее можно определить так: «максимальное число приведенных технологических передвижений за заданный период времени».

Дело в том, что пропуск поездов увязан в единый технологический процесс, прежде всего со станциями. Появление поездов не может задаваться некоторым абстрактным датчиком. В технологическом процессе возможны и перемены. Каждая операция зачастую является продолжением предыдущей. И если задержалась предыдущая, то задерживается и последующая. В таком случае структура может простаивать. К тому же передвижения могут пересекаться.

Коэффициент приведения тоже важен. Он учитывает время занятости структуры различным технологическим передвижением, так как продолжительность передвижений может быть разной.

На пропускную способность влияет и управление. Предиктивно-корректирующее управление процессами на транспорте порождает динамические резервы [5, 6]. При взаимодействии транспорта и производства они рассматриваются с функциональной точки зрения – как демпфер, способный поглощать или выдавать некоторые всплески потока. Управление потоками может замещать по функции фактические резервы структуры. Величина, на которую можно сократить фактические резервы без ущерба для надежности транспортного обслуживания, и будет величиной динамических резервов. Так как динамические резервы обеспечивают устойчивость без материальных затрат, то они более эффективны. Возникает задача определить гармоничное сочетание структуры и технологии.

Существующая методика расчета пропускной способности имеет существенные

изъяны. Ошибки есть и в исходных положениях, и в применяемых формулах. Недостаточно корректен и подход, при котором параметры пропускной способности определяются графическим методом. Наиболее корректным методом расчета является имитационное моделирование [7].

Материалы и методы исследования

Развитие полигона должно выполняться в соответствии с определенной стратегией. Выбор варианта мероприятий предполагает наличие некоторого критерия – функционала, минимум или максимум которого будет считаться рациональным вариантом, и ограничений, отображающих границы изменения связанных с функционалом переменных. Системной функцией следует считать достижение максимальной пропускной способности при ограниченных ресурсах.

Принятию оптимальных решений развития железнодорожных направлений препятствует большое количество взаимосвязанных факторов, действующих в сложных транспортных системах. В контексте имитационного моделирования железнодорожных систем целевая функция подвергается влиянию обширного набора переменных. Полный перебор всех потенциальных сочетаний параметров для выявления наилучшего решения труднодостижим. В компьютерных имитационных моделях оптимизационный процесс технологии железнодорожных комплексов реализуется как циклическая последовательность вычислений, направленная на достижение экстремума выбранной целевой функции.

Автоматизированное построение модели предусматривает преобразование структуры в элементы, а технологических процессов – в операции модели. Операция в модели – это набор элементов, записанных в определенной

последовательности, участвующих в выполнении технологического процесса [8]. Технологические операции имитируют продвижение определенного потока в пространстве и времени в виде занятия логических элементов. Бункерные элементы используются для количественного отображения емкости. При моделировании операция переносит часть потока из одного бункерного элемента в другой. При этом отображается занятость некоторого канала обработки – локомотива, горки, грузового фронта, бригады [3].

Например, парк приема (рис. 2) может иметь два сектора: входной S1 (составы до обработки) и выходной S2 (обработанные составы). Операция отображает перемещение состава из сектора S1 в сектор S2 и занятие бригады. Аналогичным образом описываются и другие технологические процессы.

Для оценки перерабатывающей и пропускной способности используются технологические бункерные элементы. Механизм занесения или снятия емкости с бункерного элемента позволяет определить количественные показатели. Например, число прибывших и убывших вагонов, локомотивов, составов, величину среднего простоя. Реальную загрузку парков, горловин, перегонов в модели можно получить с помощью подсчета занятости элементов за расчетный период. Эффективность работы в имитационной модели характеризуют задержки, возникающие вследствие занятости конкретных элементов в заданный период времени. Эти задержки играют важную роль в оценке производительности и пропускной способности моделируемой системы.

Учитывая, что пропускная и провозная способности железнодорожного направления определяются комбинацией структурных и технологических параметров, которые прямо или кос-

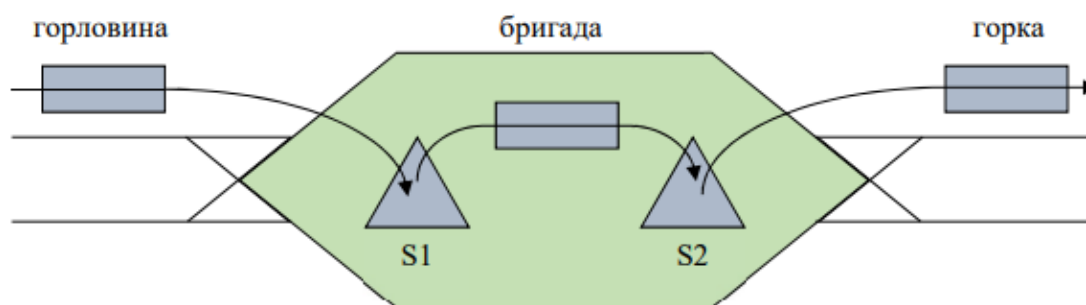


Рис. 2. Отображение работы парка приема

венно влияют на временные издержки при перевозочной работе, в роли критерия оптимизации предлагается использовать интегральную стоимостную оценку временных потерь. Следовательно, комбинация структурных и технологических параметров, полученная в имитационном эксперименте с меньшими временными потерями, будет соответствовать наибольшей пропускной способности.

Процесс имитационных экспериментов должен быть направленным. Необходимо стремиться к тому, чтобы в каждом шаге улучшение было наибольшим. В науке известна такая процедура, которая именуется наискорейшим спуском. В имитационной системе оценка временных потерь определяется величиной задержек в технологических операциях и задержек из-за элементов структуры. Задержки из-за структурных элементов могут возникать как из-за несовершенства структуры, так и из-за несоответствия технологии структуре. В имитационном спуске механизмом оптимизации является поиск решений, снижающих задержки на каждом шаге в наибольшей мере.

Здесь можно выделить два основных этапа. На первом следует попытаться снизить уровень задержек технологическими способами, не затрагивая структуру. Это не потребует больших затрат. На втором, если уровень задержек остается неприемлемо большим, совершенствовать структуру.

Задачей каждого шага будет *снижение суммарных приведенных задержек*:

$$\{t_{\text{зад}i}\}_1 \rightarrow \{t_{\text{зад}i}\}_2 \rightarrow \dots \rightarrow \{t_{\text{зад}i}\}_{\text{опт}}. \quad (3)$$

Имитационная модель формируется так, чтобы улучшаемый параметр был пропорционален размеру суммарной задержки:

$$\sum_t \sum_{x_i \in X} \sum_{P_j \in P} a_i \Delta \tau_{ij}(t), \quad (4)$$

где a_i – стоимость задержки из-за элемента x_i ; $\Delta \tau_{ij}(t)$ – задержка в операции из-за элемента x_i .

Стоимость задержки связана с видом операции. Например, из-за занятости некоторой группы стрелок откладывается перестановка состава (вагоно-часы) или обгон локомотива (локомотиво-часы). Пусть на k -м шаге экспериментов возникли задержки $\{\Delta \tau_j^k\}$. Суммарная задержка в операции P_j составит

$$\Delta \tau_j^k = \sum_t \Delta \tau_{ij}^k(t). \quad (5)$$

Далее для $\Delta \tau_j^k$ определяются стоимостные параметры a_j . Формируется множество

$\{a_j, \Delta \tau_j^k\}$, затем преобразуется в $\{a_i, \Delta \tau_i^k\}$ таким образом, что

$$\Delta \tau_i^k = \sum_t \sum_j \Delta \tau_{ij}^k(t), \quad a_i = \frac{\sum_t \sum_i \sum_j a_j \Delta \tau_{ij}^k(t)}{\sum_t \sum_j \Delta \tau_{ij}^k(t)}. \quad (6)$$

Теперь параметр a_i будет средневзвешенной стоимостью задержки по операциям из-за элемента x_i .

Очередной имитационный эксперимент осуществляется в направлении A^{k+1} с координатами $A^{k+1} = -(a_1 \Delta \tau_1^k, a_2 \Delta \tau_2^k, a_i \Delta \tau_i^k, \dots)$.

Это означает, что в каждом эксперименте достигалось наибольшее снижение суммарных приведенных задержек. Итерации заканчиваются, когда суммарные задержки будут меньше заданной величины:

$$\sum_t \sum_{P_j \in P} \sum_{x_i \in X} \Delta \tau_{ij}(t) \leq \overline{\Delta \tau}, \quad (7)$$

где $\overline{\Delta \tau}$ – установленная предельно допустимая суммарная задержка.

Обычно в этом случае становится ясно, что дальнейшие эксперименты заметного результата не дают.

Имитационная система ИМЕТРА может отображать всю реальную работу полигона, включая работу станций, локомотивное и бригадное обеспечение. Построенный в модели фрагмент графика движения на участке приведен на рис. 3. При наведении курсора на станцию высвечивается ее работа по пропуску поездов (рис. 4). Система ИМЕТРА позволяет укрупненно анализировать работу станций (рис. 5).

По построенным графикам в конкретных условиях система позволяет выполнять детальный анализ работы полигона, например анализ обеспечения поездов тяговыми ресурсами. Модель суммирует задержки из-за локомотивов и показывает их непосредственно на схеме полигона (рис. 6). Это средние задержки в минутах, приходящиеся на один поезд.

Можно увидеть, что уровень задержек на разных станциях не одинаков. Причем, на ст. Балезино задержки есть и в четном и нечетном направлении, на ст. Екатеринбург – только в нечетном, на ст. Бабаево – только в четном. Чем больше задержки, тем больше будет смещение ниток графика движения, рассчитанного без учета локомотивного обеспечения.

Задержки из-за бригад по обработке составов могут также оказывать серьезное влияние на характер графика движения. В последнее

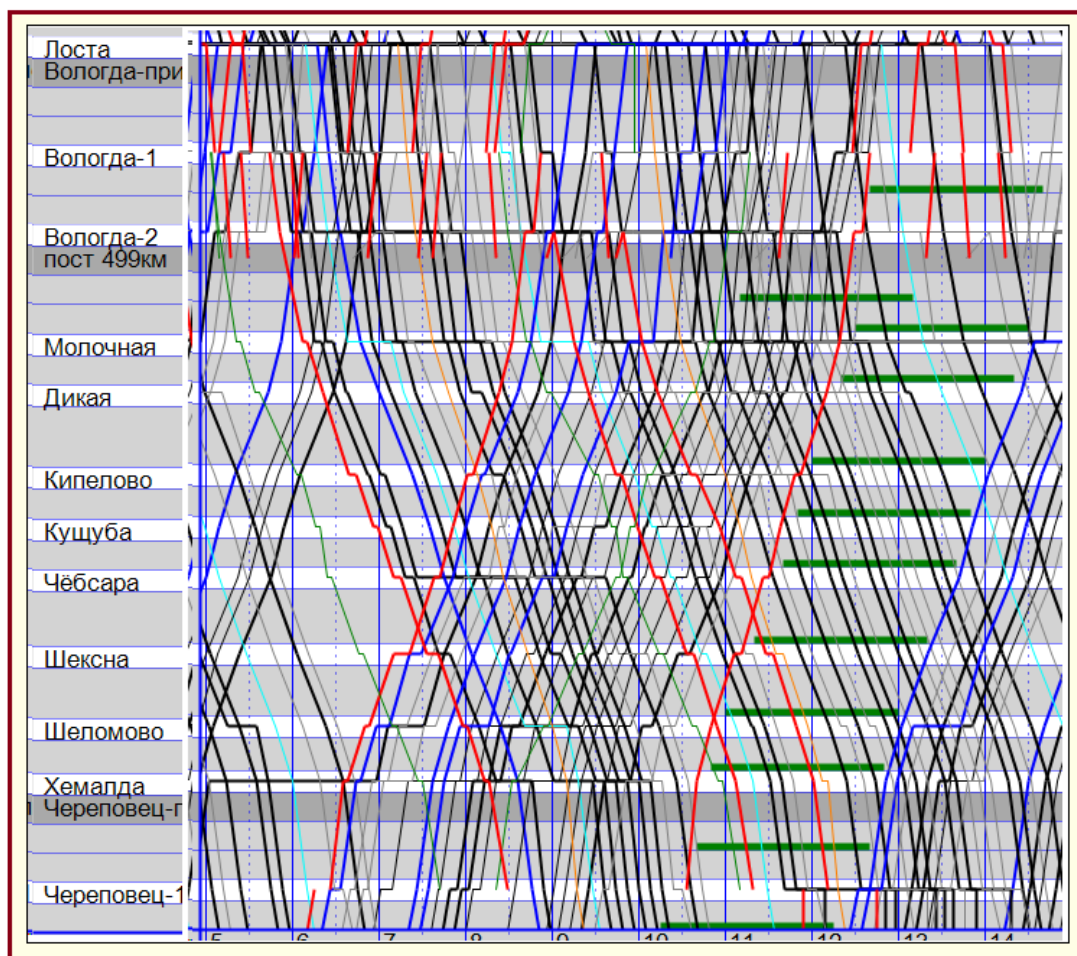


Рис. 3. Фрагмент графика движения системы ИМЕТРА

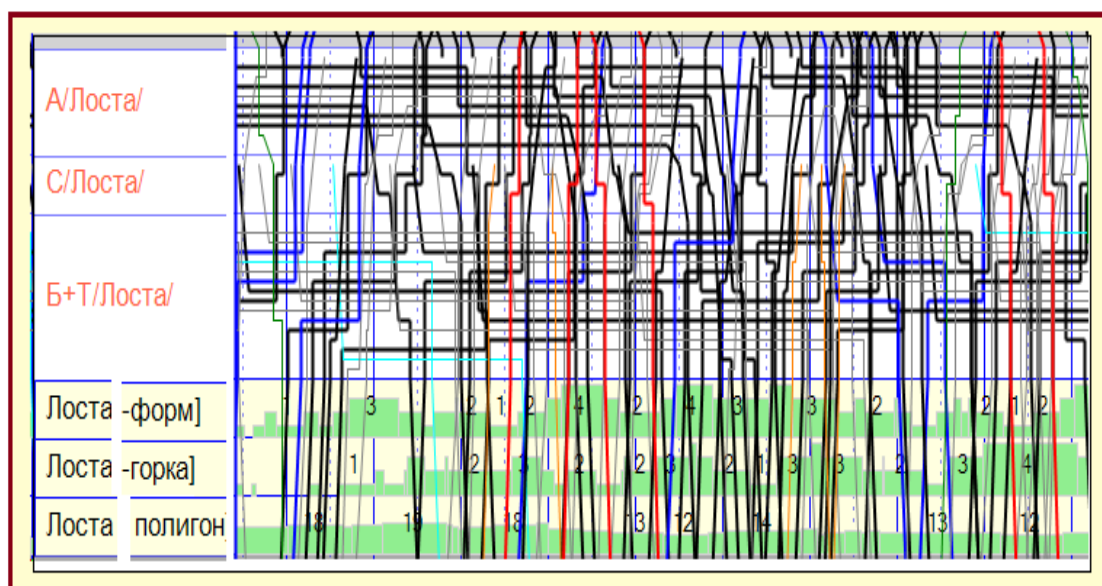


Рис. 4. Работа станции по пропуску поездов

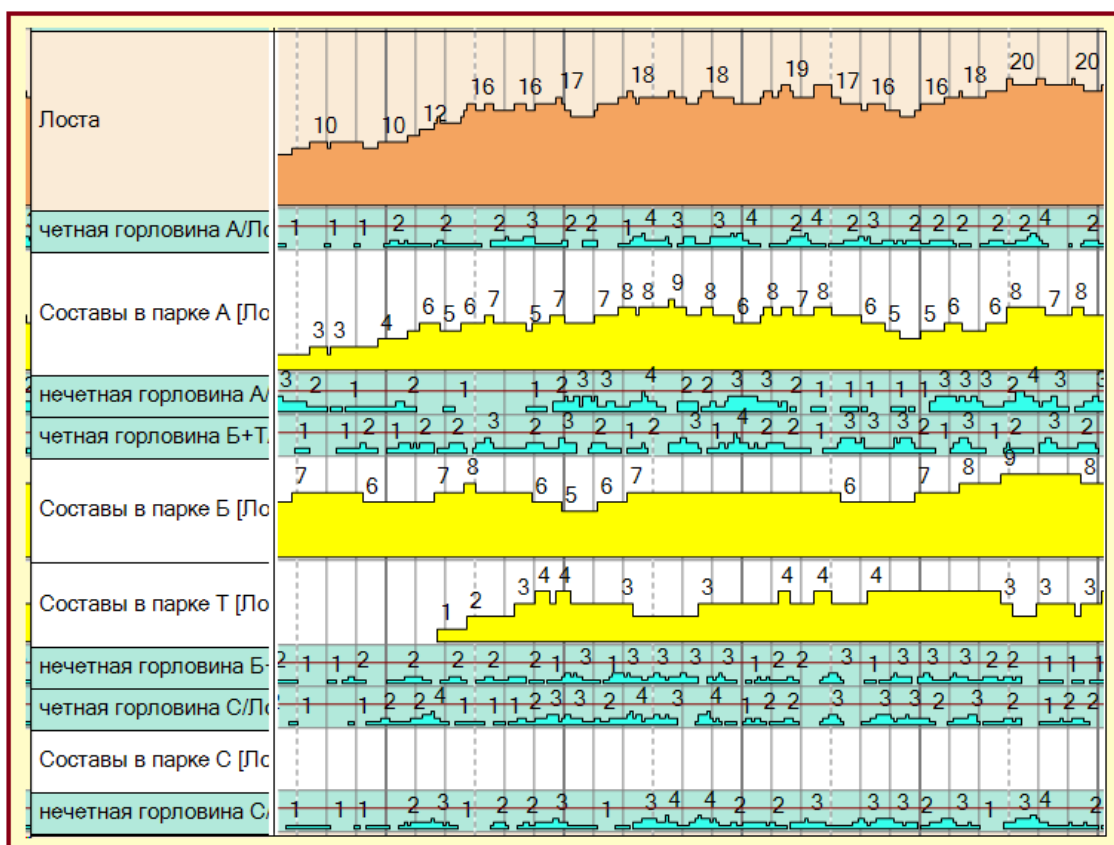


Рис. 5. Укрупненный график работы станции

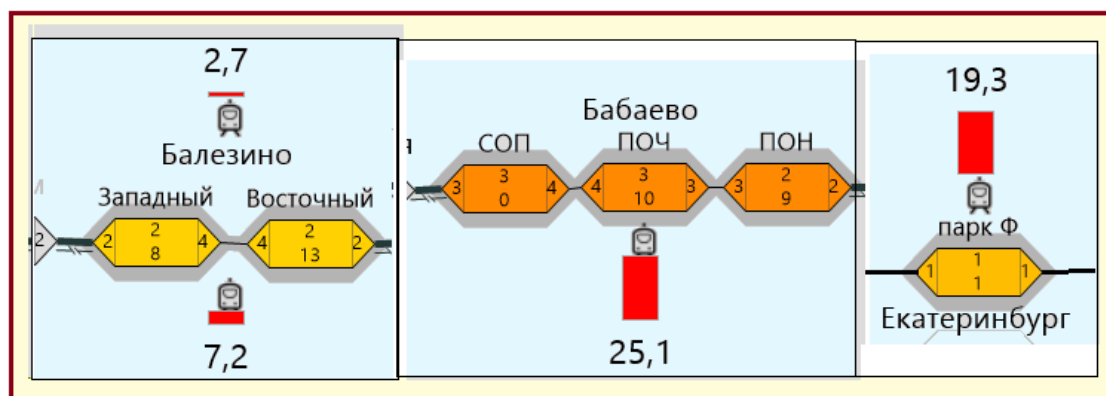


Рис. 6. Задержки из-за локомотивов на станциях, мин

время сложилась практика сокращений бригад ПТО и количества вагонников в бригадах. Можно предположить, что простои составов в ожидании обработки увеличатся. Имитационная система ИМЕТРА выдает эти задержки также на схеме полигона (рис. 7).

Существует возможность оценить уровень задержек поездов на промежуточных станциях из-за неприятия их техническими, загрузку устройств и локомотивов, а также подсчитать эксплуатационные показатели. Широкие возможности имитационной экспертизы

позволяют обосновать мероприятия по усилению пропускных способностей.

Результаты исследования и их обсуждение

Для достижения максимальной пропускной способности расчетный полигон должен иметь гармонично построенную структуру. Параметры станций и участков должны быть согласованы на всем протяжении полигона. Формально это означает «равенство структурно-функциональных пропускных способностей всех дуплексов, описывающих участки

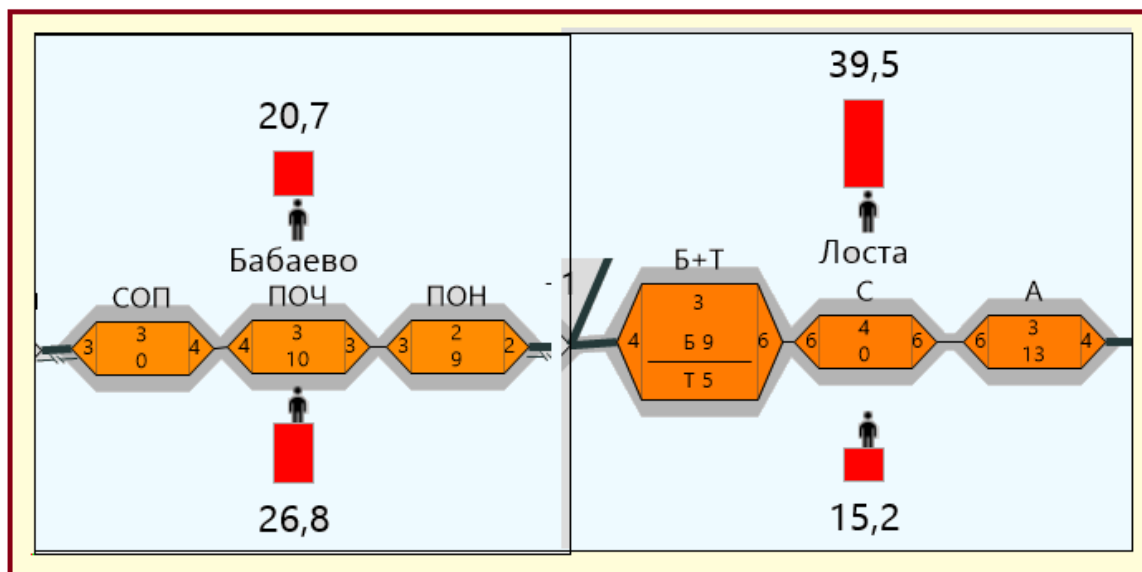


Рис. 7. Задержки составов из-за бригад ПТО

и станции». «Достижение максимальной пропускной способности возможно разными способами. Поэтому формируется множество Парето потенциально рациональных вариантов, каждый из которых не может быть улучшен по нескольким параметрам одновременно. Оптимизация на множестве Парето представляет собой выбор компромиссного варианта, когда улучшение одних параметров дает больший эффект, чем ухудшение других. В методике предлагается исследовать зависимость пропускной способности полигона от суммарной величины задержек в модели. При итерационных расчетах изменяются параметры модели таким образом, чтобы в следующем расчете задержки уменьшились.

Это означает, что на каждом шаге изменяется только один параметр – тот, стоимость задержек из-за которого была наибольшей. В этом случае кратчайший путь – это устранение узких мест в структуре полигона. Необходимо на каждом шаге выделять дуплекс с наибольшими задержками и изменять параметры для следующего цикла расчетов. Процессом оптимизации будет движение по траектории от одного множества задержек к другому и, наконец, к рациональному. Нерационально стремиться сводить издержки к нулю. Полное устранение задержек из-за одних элементов приводит, как правило, к появлению их из-за других. Например, избыточное количество бригад ПТО и устранение простоев составов в парках в условиях неравномерности вызовет простои в ожидании локомотивов» [9, 10].

Комплексное повышение пропускной способности железнодорожного полигона с точки зрения теории предполагает достижение одинаковой пропускной способности всеми станциями и участками сети, рассматриваемыми как расчетные дуплексы. Первым этапом выступает проведение структурно-функционального анализа текущего состояния полигона. Имитационное моделирование позволяет детально исследовать существующие показатели пропускной способности полигона путем оценивания числа принятых и сданных вагонов и поездов на стыковочных пунктах.

Следующим шагом становится детальное изучение функционально-структурных задержек. Данные виды задержек взаимосвязаны, следовательно, необходимо рассматривать их комплексно. Так, если функциональные задержки преобладают над структурными, вероятно наличие дефицита пропускной способности функциональных каналов обслуживания, например бригад осмотрщиков (см. рис. 7). Необходимо проверить, будет ли положительный эффект при увеличении бригад осмотрщиков. Напротив, большая доля структурных задержек свидетельствует о нехватке бункерных емкостей структуры, например путей требуемой длины в парках.

Третий этап включает в себя разработку мероприятий по выравниванию пропускной способности каждого дуплекса до оптимального уровня при имеющихся ресурсах. Повышение пропускной способности полигона должно начинаться именно с рассмотрения функциональных каналов, а не структурных, поскольку их пропускную способность увеличить

значительно легче. Процедура последовательного выбора станций с максимальными задержками (имитационный спуск), вызванными недостатком бригад осмотрщиков, дополняется серией экспериментов по увеличению числа бригад, сопровождаемых экономическими расчетами целесообразности такого решения.

Дальнейшее усиление полигона проводится за счет реконструктивных мероприятий. Соответственно, на следующем шаге выполняется оценка увеличения структурных каналов и бункерных емкостей станций. Увеличение пропускной либо провозной способности может потребовать реконструкции систем электроснабжения или реконструкции отдельных пунктов, связанной с удлинением путей для приема и обслуживания длинносоставных и состыкованных поездов. Удлинение путей на всех отдельных пунктах полигона слишком дорого, поэтому требуется определить вариант с наименьшими затратами.

Технология поиска оптимальных вариантов аналогична предыдущей задаче и базируется на применении метода имитационного спуска. Алгоритм предусматривает выбор наиболее перспективного шага на каждом этапе, позволяющего максимально эффективно приблизиться к поставленной цели. Выбор дуплекса с минимальной пропускной способностью осуществляется посредством выбора участка с наибольшими задержками пропуска поездов.

Критерии отбора предпочтительного сценария реконструкции включают в себя минимизацию инвестиционных затрат, зависящих от объема работ по переустройству, необходимого количества строительных материалов, расстояния до места расположения объекта и стоимости доставки. Дополнительно принимаются во внимание ограничения продольного профиля участков пути и возможные варианты удлинения железнодорожных путей.

По завершении выбора конкретного варианта реконструкции проводится корректировка исходной имитационной модели с последующим выполнением серии повторных расчетов для подтверждения правильности принятого решения. В случае успешного освоения рассчитанного потока поездов в рамках скорректированной имитационной модели происходит переход к следующему шагу, предусматривающему дальнейшее увеличение размеров движения.

Выводы

Таким образом, при помощи имитационной модели можно рассчитать технологический эффект проводимых мероприятий и обосновать выбор наиболее рационального варианта усиления пропускной способности полигона. Методика планирования комплексного развития полигона выполняется по схеме, приведенной на рис. 8.



Рис. 8. Методика планирования усиления провозной способности полигона

Вначале строится макромодель полигона, на которой выполняется структурное и функциональное исследование. По его результатам определяются узкие места, дуплексы. Далее производится изменение структуры или тех-

нологии работы, которое устранит узкое место. Этот этап является циклическим и непосредственно представляет собой поиск рационального варианта развития полигона для увеличения пропускной способности.

Список источников

1. Повышение экономической эффективности функционирования существующих систем железнодорожного транспорта за счет применения уточненного подхода к расчету перерабатывающей способности обслуживающих устройств / Е. Н. Тимухина, Н. В. Кашеева, В. С. Колокольников, А. А. Кощеев // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2019. № 2 (49). С. 26–33.
2. Слободянюк И. Г. Функциональный подход к моделированию транспортных систем // Транспорт Урала. 2017. № 2 (53). С. 96–101. DOI 10.20291/1815-9400-2017-2-96-101.
3. Козлов П. А., Колокольников В. С., Тушин Н. А. О загрузке стрелок и пропускной способности горловин // Транспорт Урала. 2016. № 4 (51). С. 3–7. DOI 10.20291/1815-9400-2016-4-3-7.
4. Козлов П. А., Тушин Н. А., Слободянюк И. Г. Макромоделирование железнодорожных станций и узлов // Наука и техника транспорта. 2015. № 2. С. 82–88.
5. Козлов П. А., Владимирская И. П. Теоретические основы оптимизации структуры транспортных систем // Наука и техника транспорта. 2009. № 4. С. 13–17.
6. Козлов П. А., Осокин О. В., Тушин Н. А. Организационные подходы и модели оптимизации // Мир транспорта. 2011. Т. 9, № 5 (38). С. 18–23.
7. О технологии расчета систем железнодорожного транспорта / П. А. Козлов, В. П. Козлова, О. В. Осокин, Н. А. Тушин // Транспорт Урала. 2022. № 3 (74). С. 3–9. DOI 10.20291/1815-9400-2022-3-3-9.
8. Александров А. Э. Расчет и оптимизация транспортных систем с использованием моделей (теоретические основы, методология) : специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Александров Александр Эрнстович. Екатеринбург, 2008. 285 с.
9. Козлов П. А., Колокольников В. С., Тушин Н. А. Расчет параметров гармонически построенной сети железных дорог // Железнодорожный транспорт. 2018. № 12. С. 18–21.
10. Козлов П. А., Колокольников В. С. Расчет и оптимизация полигонов железнодорожного транспорта // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2018. № 3 (71). С. 113–120.

References

1. Timukhina E. N., Kashcheeva N. V., Kolokolnikov V. S., Koshcheev A. A. Improving the economic efficiency of existing railway transport systems by applying a refined approach to calculating the processing capacity of service devices. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2019;(49):26–33. (In Russ.).
2. Slobodanyuk I. G. Functional approach to modeling transport systems. *Transport of the Urals*. 2017;(53):96–101. (In Russ.). DOI 10.20291/1815-9400-2017-2-96-101.
3. Kozlov P. A., Kolokolnikov V. S., Tushin N. A. On the loading of switches and the throughput capacity of the throats. *Transport of the Urals*. 2016;(51):3–7. (In Russ.). DOI 10.20291 / 1815-9400-2016-4-3-7.
4. Kozlov P. A., Tushin N. A., Slobodanyuk I. G. Macromodeling of railway stations and junctions. *Science and Technology of Transport*. 2015;(2):82–88. (In Russ.).
5. Kozlov P. A., Vladimirskaia I. P. Theoretical foundations of optimization of the structure of transport systems. *Science and Technology of Transport*. 2009;(4):13–17. (In Russ.).
6. Kozlov P. A., Osokin O. V., Tushin N. A. Organizational approaches and optimization models. *World of Transport*. 2011;9(38):18–23. (In Russ.).
7. Kozlov P. A., Kozlova V. P., Osokin O. V., Tushin N. A. On the technology of calculating railway transport systems. *Transport of the Urals*. 2022;(74):3–9. (In Russ.). DOI 10.20291/1815-9400-2022-3-3-9.
8. Aleksandrov A. E. Calculation and optimization of transport systems using models (theoretical foundations, methodology): specialty 05.22.08 ‘Transportation process management’: dissertation for the degree of Doctor of Engineering / Aleksandrov Aleksandr Ernstovich. Ekaterinburg; 2008. 285 p. (In Russ.).
9. Kozlov P. A., Kolokolnikov V. S., Tushin N. A. Calculation of parameters of a harmonically constructed railway network. *Railway Transport*. 2018;(12):18–21. (In Russ.).
10. Kozlov P. A., Kolokolnikov V. S. Calculation and optimization of railway transport polygons. *Bulletin of the Rostov State Transport University*. 2018;(71):113–120. (In Russ.).

Информация об авторах

Н. А. Тушин – доктор технических наук, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения.

И. Г. Слободянюк – кандидат технических наук, директор ООО «Транспортно-логистическая компания «Уралконтейнер».

П. Е. Раевская – старший преподаватель кафедры «Управление эксплуатационной работой» Иркутского государственного университета путей сообщения.

К. М. Тимухин – кандидат технических наук, доцент кафедры «Станции, узлы и грузовая работа» Уральского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

N. A. Tushin – Doctor of Engineering, Professor of the Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport.

I. G. Slobodyanyuk – Candidate of Engineering, Director of Transport and Logistics Company Uralcontainer.

P. E. Raevskaya – Senior Lecturer of the Operations Management Department, Irkutsk State Transport University.

K. M. Timukhin – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Stations, Hubs and Cargo Work Department, Ural State University of Railway Transport.

Статья поступила в редакцию 10.09.2025; одобрена после рецензирования 09.10.2025; принята к публикации 16.10.2025.

The article was submitted 10.09.2025; approved after reviewing 09.10.2025; accepted for publication 16.10.2025.

Научная статья
УДК. 338.001.36
doi:10.52170/1815-9265_2025_77_42

Предпосылки развития транспортной системы Сибирской и Арктической зон России: Северо-Сибирская магистраль

Валерий Степанович Воробьев^{1✉}, Алексей Леонидович Манаков²

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

¹ vorobjevvs@yandex.ru✉

² manakov005@mail.ru

Аннотация. В настоящее время актуализирована проблема обоснования научного подхода к пространственному развитию и формированию производственных и организационных процессов транспортной инфраструктуры Сибирской и Арктической зон России. Разработка нефтяных и газовых месторождений Севера, активизация освоения Северного морского пути, кризисные проблемы угольной промышленности и других отраслей Сибирского региона, сложные международные отношения побуждают исследовать, дополнять и корректировать ранее принятые решения по развитию транспортной сети. Возникла научно-прикладная проблема предпроектного исследования и научного обоснования включенной в Стратегию развития железнодорожного транспорта до 2030 года Северо-Сибирской магистрали Нижневартовск – Усть-Илимск с дополнением западного участка до п. Сабетта, восточного участка от Усть-Илимска до п. Хребтовая – Усть-Кут, а также Белый Яр – Томск – Юрга – Новокузнецк – Таштагол – Горно-Алтайск – Урумчи, позволяющего создать инфраструктурные условия для развития экономики Сибири, Республики Алтай и формирования Северного пояса экономического развития страны, который будет способствовать разгрузке Транссибирской железнодорожной магистрали при исчерпании ее пропускной способности, а также обеспечению транспортной безопасности России и укреплению торговых отношений с Китайской Народной Республикой. Цель проекта состоит в разработке научного подхода к изучению производственных и организационных процессов транспортной инфраструктуры Северо-Сибирской магистрали. В статье систематизированы акваториальные комплексы. Предлагаемый научно-методический подход дает возможность проводить сравнительную оценку альтернативных вариантов организации строительства крупномасштабных железнодорожных проектов, их моделирования на основе предпроектных исследований и проведения технико-экономического обоснования. В рамках данного исследования предложена маршрутная схема, которая способна обеспечить транспортную связанность Сибирского региона, расширение возможностей по освоению минерально-сырьевой базы, выход на Северный морской путь и достаточные провозные мощности для вывода продукции на рынки Китая и других стран АТР. Выполнена прогнозная оценка потенциальной грузовой базы. В условиях сложной горной местности предлагается построить железную дорогу вдоль автомобильной трассы М-52 из Горно-Алтайска до Кош-Агача с дальнейшим выходом на Урумчи (КНР). Обоснован обход заповедной зоны Алтая и прямой граничный переход между РФ и КНР.

Ключевые слова: транспортная система, магистраль, проект, научный подход, стратегия, социально-экономическое развитие

Для цитирования: Воробьев В. С., Манаков А. Л. Предпосылки развития транспортной системы Сибирской и Арктической зон России: Северо-Сибирская магистраль // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 5 (77). С. 42-49. DOI 10.52170/1815-9265_2025_77_42.

Original article

Prerequisites for the development of the transport system of the Siberian and Arctic zones of Russia: The North-Siberian Railway

Valery S. Vorobyov^{1✉}, Alexey L. Manakov²

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

¹ vorobjevvs@yandex.ru✉

² manakov005@mail.ru

Abstract. Currently, the problem of substantiating a scientific approach to the spatial development and formation of production and organizational processes of the transport infrastructure of the Siberian and Arctic zones of Russia is being actualized. The development of oil and gas fields in the North, the intensification of the Northern Sea Route, the crisis problems of the coal industry and other sectors of the Siberian region, and complex international relations encourage us

to explore, supplement, and adjust previously made decisions on the development of the transport network. There was a scientific and applied problem of pre-design research and scientific justification of the North Siberian Railway Nizhnevartovsk-Ust-Ilimsk included in the Railway Transport Development Strategy until 2030, with the addition of the western section to Sabetta, the eastern section from Ust-Ilimsk to Khrebtovaya – Ust-Kut, as well as Bely Yar – Tomsk – Yurga – Novokuznetsk – Tashtagol – Gorno-Altaysk – Urumqi, which allows creating infrastructural conditions for the development of the economy of Siberia, the Altai Republic and the formation of the Northern Belt of Economic Development of the country, which will facilitate the unloading of the Trans-Siberian Railway when its capacity is exhausted, as well as ensuring transport security of Russia and the strengthening of trade relations with the People's Republic of China. The aim of the project is to develop a scientific approach to the study of the production and organizational processes of the transport infrastructure of the North Siberian Railway. The article systematizes the aquaterritorial complexes, the proposed scientific and methodological approach makes it possible to conduct a comparative assessment of alternative options for organizing the construction of large-scale railway projects, their modeling based on pre-design studies and conducting a feasibility study. Within the framework of this study, a route scheme has been proposed that, when implemented, can ensure transport connectivity for all Siberian regions, expand opportunities for developing the mineral resource base, access to the Northern Sea Route and sufficient transportation capacity to bring products to the markets of China and other countries of the Asia-Pacific region. A forecast assessment of the potential cargo base has been made. In conditions of difficult mountainous terrain, it is proposed to build a railway along the M-52 highway from Gorno-Altaysk to Kosh-Agach with further access to Urumqi (China). The bypass of the Altai protected area and the direct border crossing between the Russian Federation and China are justified.

Keywords: transport system, highway, project, scientific approach, strategy, socio-economic development

For citation: Vorobyov V. S., Manakov A. L. Prerequisites for the development of the transport system of the Siberian and Arctic zones of Russia: The North-Siberian Railway. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(77):42-49. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_77_42.

Введение

В наступившем XXI в. для России стратегически важно развитие геополитического, оборонного и минерально-сырьевого потенциалов страны. Взаимосвязанная и эффективная система грузоперевозок должна стать основой для укрепления торгово-экономических связей стран-участниц и создания новых возможностей для бизнеса в Евразийском регионе. При этом важно обеспечить сбалансированное развитие всех видов транспорта, с учетом их специфики и преимуществ, а также соблюдение интересов всех участников перевозочного процесса. В этом смысле роль Арктики крайне важна [1–4]. Вместе с тем недостаточное освоение этой территории, крайне неблагоприятные условия жизнедеятельности населения и наличие слабой производственной инфраструктуры значительно удорожают и усложняют реализацию проектов по освоению ресурсов прибрежной территории и акватории морей Северного Ледовитого океана.

Будучи уникальным транспортным коридором всей коммуникационной системы России в Арктике, Северный морской путь (СМП) связывает крупнейшие речные артерии России в единую транспортную сеть и служит важнейшей частью инфраструктуры экономического комплекса Крайнего Севера [5–8]. Приоритетом взаимодействия России со странами Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР) является создание новых устойчивых безопасных транспортных магистралей.

Одной из важнейших проблем реализации Стратегии социально-экономического развития Сибирского федерального округа на период до 2035 года является преодоление инфраструктурных ограничений по вывозу сибирской продукции за пределы округа, в том числе на экспорт.

В условиях большой загрузки Транссибирской магистрали необходимо создать возможности для выхода Сибирского региона на СМП с целью доставки продукции в КНР, минуя Транссиб и железнодорожные пути третьих стран. Не менее важным также представляется обеспечение максимально коротких транспортных связей между регионами Западной и Восточной Сибири, а также соседними государствами.

Актуальность освоения Арктической зоны возрастает и становится неотъемлемой стратегией развития существующих и будущих акваториальных комплексов. В связи с этим необходим анализ и научное обоснование развития действующей транспортной сети Сибирской и Арктической зон России и создания новой, которые образуют в совокупности опорную транспортную сеть региона.

Материалы и методы исследования

Минерально-сырьевой потенциал региона и основные направления создания опорной транспортной сети России, предложенные в первой половине XXI в., позволят создать транспортный каркас, состоящий из радиальных трасс железных дорог, выходящих из Северо-Сибир-

ской, Байкало-Амурской, Транссибирской магистралей и Центрально-Евразийского транспортно-логистического коридора на Северный морской путь. В настоящее время для реализации транспортно-логистических мегапроектов нужны международные усилия.

Исходными материалами для предпроектных исследований явились акваторриальные производственные комплексы (АТПК) [9]. Ряд из них, а именно: Архангельский, Ямальский, Ненецкий, Норильско-Туруханский, Кольский, Северо-Якутский, Чукотский, Таймырский – имеют или должны иметь выходы на морские порты: Архангельск, Диксон, Дудинка, Мурманск, Индига, Тикси, Певек (табл. 1).

В течение ряда лет велись научные исследования по реализации проекта «Северо-Сибирская магистраль» [10–12], что явилось основанием для его включения в Стратегию развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года [13]. В СГУПС продолжены разработки, актуализированные межрегиональной ассоциацией «Сибирское соглашение» в связи с поручением президента РФ.

В качестве возможных методов решения указанной задачи нами организованы исследования по оценке предварительной целесообразности строительства комплекса железнодорожных коридоров:

- Северо-Сибирская железнодорожная магистраль (Севсиб): порт Сабетта – Бованенково –

Салехард – Новый Уренгой – Коротчаево – Сургут – Нижневартовск – Белый Яр – Лесосибирск – Ярki – Усть-Илимск – Хребтовая;

- ответвление от Севсиба: Белый Яр – Томск – Юрга – Новокузнецк – Таштагол – Горно-Алтайск – Урумчи;

- Центрально-Евразийский транспортный коридор (ЦЕТК): Красноярск – Курагино – Кызыл – Цаган-Толгой – Урумчи;

- ответвление от ЦЕТК: Курагино – Абакан – Новокузнецк.

Северо-Сибирская железнодорожная магистраль рассматривается как самостоятельный проект. Одним из главных мотивов ее строительства является разгрузка Транссибирской магистрали и впоследствии расширение зоны хозяйственного освоения Восточной и Западной Сибири. Первостепенное значение принадлежит Северо-Сибирской железнодорожной магистрали, образующей с БАМом Северо-Российскую магистраль, меридиональным железным дорогам для обеспечения транспортно-логистических связей с Северным морским путем, Приполярной железнодорожной магистралью, Кузбасским угольным бассейном, Канско-Ачинским топливно-энергетическим комплексом, железными дорогами иностранных государств. В настоящее время актуализирована проблема транспортировки нефти от нефтепромыслов севера Средней Сибири в КНР по кратчайшему пути и с минимальным временем поставок.

Таблица 1

Акваторриальные комплексы

Порты СМП	Архангельский	Ямальский	Ненецкий	Норильско-Туруханский	Кольский	Северо-Якутский	Чукотский	Таймырский
Архангельский, Мурманский, Индига, Игарка, Дудинка, Диксон, Певек, Хатанга	Белкомур (Архангельск – Сыктывкар – Соликамск – Пермь) 1 161 км. Порты Архангельский, Мурманский	Бованенское месторождение. Ж.-д. магистраль Баренцкомур (Индига – Сосногорск – Полуночное – Сургут) 1 200 км. Проект в Стратегии развития ж.-д. транспорта до 2030 г.	Порт Индига. Ж. д. Ивдель – Ухта – Индига. Трубопровод Харьяга – Индига	Красноярский край. Крупные промышленные центры (комплексы): Норильский, Ванкорский, Диксонский, Игарский, Дудинский. Ж. д. Уренгой – Норильск. Порты на трассе СМП: Игарка, Дудинка, Диксон	Порт Мурманский	Слабая геологическая изученность (труднодоступный горный рельеф и суровый климат)	Порт Певек СМП	Ж. д. до Норильска с выходом на Игарку или Дудинку. Строительство ж. д. к порту Хатанга
Сабетта	Радиальные трассы железных дорог с выходом на Северо-Сибирскую, Байкало-Амурскую, Транссибирскую магистрали и евро-азиатский транспортный коридор							

С учетом этих факторов возросла значимость строительства железной дороги до Урумчи с прямым переходом российско-китайской границы.

Результаты исследования

Результаты проведенной работы были представлены правительству, сделаны выводы о потенциально высокой целесообразности строительства предложенных советом МАСС маршрутов.

Маршрутная схема, при ее реализации в любой из предложенных конфигураций, способна обеспечить транспортную связанность Сибирского региона, расширение возможностей по освоению минерально-сырьевой базы, выход на Северный морской путь и достаточные провозные мощности для вывода продукции на рынки Китая и других стран АТР. Такой вывод сделан в результате укрупненной оценки протяженности и стоимости строительства каждого из элементов этих маршрутов.

Выполнена прогнозная оценка потенциальной грузовой базы. В рамках Севсиба предполагается увеличение перевозок каменного угля, кокса, черных и цветных металлов, удобрений, химикатов и соды, а также контейнеров.

В частности, до 2050 г. грузовая база составит 50,6 млн т, из них:

- на участке Кузбасс – Нижневартовск – п. Сабетта 11,4 млн т, в том числе 11,0 млн т каменного угля;

- на участке Кузбасс – Урумчи 39,2 млн т, в том числе 37,6 млн т каменного угля (табл. 2).

В настоящее время из Горно-Алтайска до Кош-Агача проложена автомобильная дорога М-52. В рамках сохранения природной заповед-

ной зоны в Республике Алтай и в условиях сложной горной местности предлагается построить железную дорогу вдоль автомобильной трассы М-52 из Горно-Алтайска до Кош-Агача с дальнейшим выходом на Урумчи (рис. 1).

Транспортный коридор Сабетта – Урумчи возможно построить по двум направлениям: с ответвлением дороги от Горно-Алтайска (Кош-Агач) до станции Бэйтунь (307 км) или от Горно-Алтайска (Кош-Агач) до Урумчи (687 км). Протяженность транспортного коридора Сабетта – Урумчи (Сабетта – Бэйтунь) указана на рис. 2.

На рис. 3 приведена карта местности с обходом заповедной зоны Республики Алтай и прямым граничным переходом между РФ и КНР.

Комитеты государственного совета РФ по энергетике и экономике поддержали постановление совета МАСС от 16.11.2023 с рекомендацией строительства Северо-Сибирской железнодорожной магистрали, в том числе с учетом необходимости дополнения западного участка маршрута до п. Сабетта, обусловленного разработкой нефтяных и газовых месторождений Севера, активизацией освоения Северного морского пути, а также дополнения восточного участка от Усть-Илимска до п. Хребтовая – Усть-Кут, позволяющего создать инфраструктурные условия для развития экономики Сибири и формирования Северного пояса экономического развития страны, который будет способствовать разгрузке Транссибирской железнодорожной магистрали при исчерпании ее пропускной способности, а также обеспечению транспортной безопасности России.

Таблица 2

Грузовая база железнодорожных перевозок из Кузбасса с использованием новых транспортных коридоров до 2050 г., тыс. т

Номенклатура грузов	Всего	Кузбасс – Нижневартовск – п. Сабетта	Кузбасс – Урумчи
1. Каменный уголь	48 600	11 000	37 000
2. Нефть	–	–	–
3. Кокс	360	–	360
4. Черные металлы	900	–	900
5. Цветные металлы	132	–	132
6. Удобрения	580	420	160
7. Контейнеры	50	25	25
8. Химикаты и сода	24	–	24
9. Прочая погрузка	–	–	–
<i>Итого</i>	50 646	11 445	39 201



Рис. 1. Карта автомобильной дороги Горно-Алтайск – Кош-Агач (М-52)



Рис. 2. Протяженность транспортного коридора Сабетта – Урумчи (Сабетта – Бэйтунь)

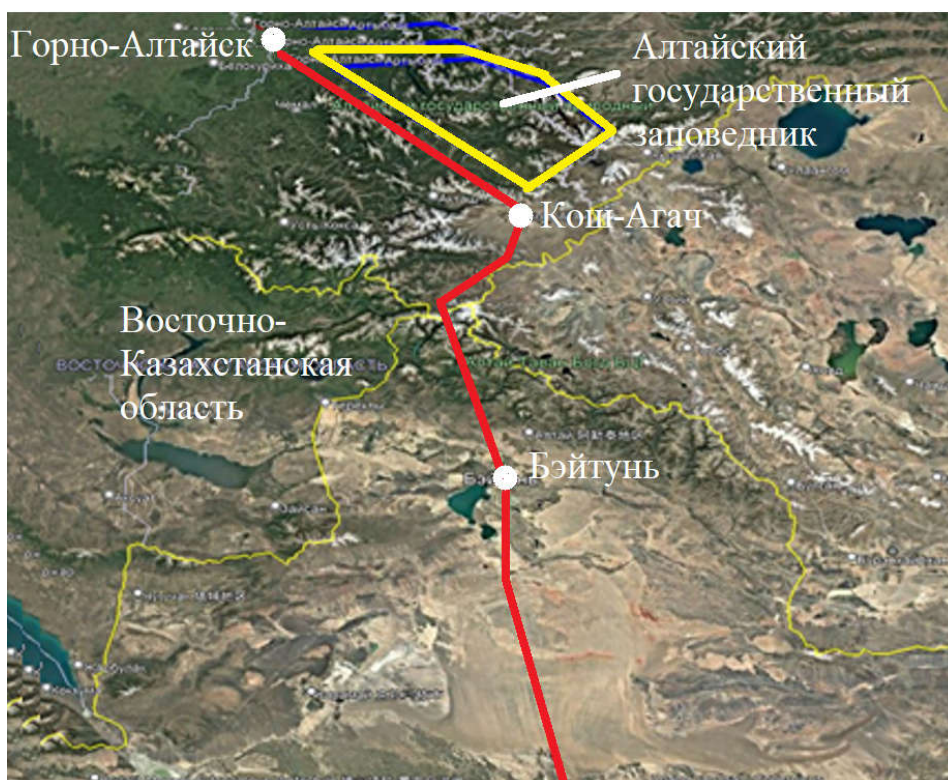


Рис. 3. Карта местности с трассой обхода заповедной зоны Республики Алтай и прямым граничным переходом между РФ и КНР

Выводы

Для продолжения работ необходимо выполнить технико-экономическое обоснование, включающее камеральное трассирование по вариантам для определения основного направления линии: Сабетта – Бованенково – Новый Уренгой – Коротчаево – Сургут – Нижневартовск – Белый Яр – Томск – Юрга – Новокузнецк – Таштагол – Горно-Алтайск – Кош-Агач – Урумчи, а также вариантов организации строительства, ресурсного обеспечения.

Исходя из высокой значимости и потенциальной экономической целесообразности предлагаемых проектов для реализации стратегии пространственного развития Сибирского федерального округа Российской Федерации на период до 2036 г., нами внесены следующие предложения:

1. Выполнить научное обоснование целесообразности создания транспортно-логистической системы Сибири, направленной на реализацию стратегии развития Сибирского федерального округа до 2035 г., с оценкой синхронизации развития территориальных производственных комплексов, реализации проектов Северо-Сибирской магистрали и Центрально-Евразийского транспортного коридора

в условиях активизации освоения Северного морского пути.

2. Выполнить технико-экономическое обоснование транспортно-логистических проектов международных транспортных коридоров: Северо-Сибирской железной дороги и Центрально-Евразийского транспортного коридора, формирующих систему опорных населенных пунктов СФО; планирование создания новых объектов инфраструктуры минерально-сырьевых центров, реализующих стратегию социально-экономического развития СФО.

3. С целью оценки эффективности реализации стратегии социально-экономического развития Сибирского федерального округа до 2035 года выполнить исследования по определению влияния реализации проектов международных транспортных коридоров – Севсиба и ЦЕТК на социально-экономическое развитие СФО.

4. Разработать научный подход к пространственному развитию формирования производственных и организационных процессов транспортной инфраструктуры Северо-Сибирской магистрали по этапам жизненного цикла и их моделирования в рамках инвестиционного проектирования и выполнения предпроектных исследований.

Список источников

1. Азиатская часть России : Новый этап освоения северных и восточных регионов страны / В. Ю. Малов, Л. А. Безруков, М. В. Шиловский [и др.]. Новосибирск : ИЭОПП СО РАН, 2008. 428 с.
2. Траектории в высоких широтах / под ред. Ю. В. Неелова, А. В. Артеева, В. А. Ламина [и др.]. Новосибирск : Наука, 2011. 440 с.
3. Пак М. В. Оценка сценариев развития транспортной системы Арктики в условиях неопределенности // Таможенное дело : актуальные проблемы. Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2021. С. 108–112.
4. Формирование развития транспортной сети Северо-Восточного региона РФ / В. Д. Верескун, В. С. Воробьев, Н. Ю. Купреева, И. Б. Репина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2024. № 4. С. 29–39.
5. «Северные ворота» и базовый порт Индига на пути России в Атлантику // Проблемные регионы ресурсного типа: экономическая интеграция Европейского Северо-Востока, Урала и Сибири. Новосибирск : ИЭОПП, 2002. С. 224–238.
6. Малов В. Ю., Тарасова О. В. Транспорт Арктической зоны России как сфера сопряжения интересов государства и корпораций // Регион: экономика и социология. 2013. № 3 (79). С. 3–20.
7. Новые порты Северного морского пути // Геопроостранственная аналитика : [сайт]. URL: <https://geonovosti.terratech.ru/economy/novye-porty-severnogo-morskogo-puti/?ysclid=lw258ntjqz943875260>. Дата публикации: 16.03.2023.
8. Problems and prospects of the Northern Sea Route as an element of the single Arctic transport system // Россконгресс : фонд. URL: <https://roscongress.org> (дата обращения: 25.12.2024).
9. Воробьев В. С., Пак М. В. О перспективных контурах формирования транспортной системы Арктической территории России // Вопросы новой экономики. 2020. № 1 (53). С. 36–44.
10. Кибалов Е. Б., Кин А. А., Комаров К. Л. К вопросу о концепции сооружения Северо-Сибирской железнодорожной магистрали // Регион: экономика и социология. 2008. № 2. С. 255–270.
11. Северо-Сибирская магистраль: предпроектные исследования / В. Я. Ткаченко, В. Ю. Малов, В. Д. Верескун [и др.]; отв. ред. В. Я. Ткаченко. Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2010. 240 с.
12. Прокофьева Т. А., Гончаренко С. С. Строительство Северо-Сибирской магистрали – один из главных приоритетов развития транспортной системы Сибири и экономики России // Россия в современном мире : экономическая оценка : коллективная монография. Москва : ЭКЦ «Профессор», 2017. С. 99–109.
13. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902111037> (дата обращения: 25.11.2019).

References

1. Malov V. Yu., Bezrukov L. A., Shilovsky M. V. [et al.]. The Asian part of Russia: A new stage in the development of the northern and eastern regions of the country. Novosibirsk: IEPP SB RAS; 2008. 428 p. (In Russ.).
2. Trajectories in high latitudes. Edited by Yu. V. Neelov, A. V. Arteeve, V. A. Lamin [et al.]. Novosibirsk: Nauka; 2011. 440 p. (In Russ.).
3. Pak M. V. Assessment of scenarios for the development of the Arctic transport system in conditions of uncertainty. *Customs Business: Actual Problems*. Novosibirsk: Siberian Transport University; 2021. P. 108–112. (In Russ.).
4. Vereskun V. D., Vorobyov V. S., Kupreeva N. Y., Repina I. B. Formation of the transport network development in the Northeastern region of the Russian Federation. *Bulletin of the Rostov State Transport University*. 2024;(4):29–39. (In Russ.).
5. 'Northern Gate' and the base port of Indiga on Russia's way to the Atlantic. *Problematic Resource-type Regions: Economic Integration of the European Northeast, the Urals and Siberia*. Novosibirsk: IEOPP; 2002. P. 224–238. (In Russ.).
6. Malov V. Yu., Tarasova O. V. Transport of the Arctic zone of Russia as a sphere of interfacing interests of the state and corporations. *Region: Economics and Sociology*. 2013;(79):3–20. (In Russ.).
7. New ports of the Northern Sea Route. *Geospatial Analytics: [site]*. 16.03.2023. (In Russ.). URL: <https://geonovosti.terratech.ru/economy/novye-porty-severnogo-morskogo-puti/?ysclid=lw258ntjqz943875260>.
8. Problems and prospects of the Northern Sea Route as an element of the single Arctic transport system. *Roscongress: [site]*. (In Russ.). URL: <https://roscongress.org>.
9. Vorobyov V. S., Pak M. V. On the promising contours of the formation of the transport system of the Arctic territory of Russia. *Issues of the New Economy*. 2020;(53):36–44. (In Russ.).
10. Kibalov E. B., Kin A. A., Komarov K. L. On the concept of the construction of the North Siberian Railway. *Region: Economics and Sociology*. 2008;(2):255–270. (In Russ.).

11. Tkachenko V. Ya., Malov V. Yu., Vereskun V. D. [et al.]. The North Siberian Railway: pre-design studies. Edited by Tkachenko V. Ya. Novosibirsk: Siberian Transport University; 2010. 240 p. (In Russ.).
12. Prokofieva T. A., Goncharenko S. S. The construction of the North Siberian Railway is one of the main priorities for the development of the Siberian transport system and the Russian economy. *Russia in the Modern World: an Economic Assessment: a Collective Monograph*. Moscow: ETC 'Professor'; 2017. P. 99–109. (In Russ.).
13. Strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030, approved by Decree of the Government of the Russian Federation dated 17.06. 2008 No. 877-р/. *Electronic fund of legal and regulatory documents*. (In Russ.). URL: <http://docs.cntd.ru/document/902111037>.

Информация об авторах

В. С. Воробьев – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология, организация и экономика строительства» Сибирского государственного университета путей сообщения.

А. Л. Манаков – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Подъемно-транспортные, путевые, строительные и дорожные машины» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

V. S. Vorobyov – Doctor of Engineering, Professor of the Technology, Organization, and Economics of Construction Department, Siberian Transport University.

A. L. Manakov – Doctor of Engineering, Professor, Professor of the Lifting, Transport, Track, Construction, and Road Machinery Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 28.10.2025; одобрена после рецензирования 05.11.2025; принята к публикации 17.11.2025.

The article was submitted 28.10.2025; approved after reviewing 05.11.2025; accepted for publication 17.11.2025.

Научная статья
УДК 656.212.5
doi:10.52170/1815-9265_2025_77_50

Исследование элемента продольного профиля «противоуклон» в выходной части сортировочного парка

Александр Александрович Климов

Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия, a-aklimov@yandex.ru

Аннотация. Произведено исследование конструкции элемента продольного профиля выходной части сортировочного парка «противоуклон». Рассмотрена ретроспектива изменения нормативных требований к данному элементу выходной части полезной длины сортировочных путей. Проанализированы действующие нормативы к проектированию противоуклона и результаты современных научных работ по направлению исследования конфигурации продольного профиля сортировочных путей, на основании которых определены факторы, влияющие на значения длины и уклона данного элемента профиля. Произведено моделирование скатывания отцепов различной длины в сортировочном парке, по результатам которого выполнено сравнение вариантов конструкции элемента продольного профиля «противоуклон». Эксперименты по скатыванию отцепов в сортировочном парке проведены с использованием имитационной модели, разработанной при участии автора. При моделировании задействованы существующие значения основного удельного сопротивления движению вагонов при скатывании с горки, а также «новые» значения основного сопротивления, полученные по результатам исследований, выполненных при участии автора. Сформулирован перечень технологических задач, решение которых целесообразно производить при определении конфигурации выходной части продольного профиля сортировочных парков в процессе проектирования новых или реконструкции существующих сортировочных горок. Определено, что длину и значение уклона элемента продольного профиля «противоуклон» необходимо устанавливать расчетом для каждой конкретной сортировочной горки с использованием положений методики, изложенной в данной статье. При этом следует учитывать: конфигурацию продольного профиля путей сортировочного парка, наличие и технические характеристики средств регулирования скорости скатывания отцепов, метеорологические условия местности расположения станции, структуру перерабатываемого вагоно- и отцепопотока, а также ограничения по максимальной длине вагонов в отцепе.

Ключевые слова: сортировочная горка, моделирование скатывания отцепов, основное удельное сопротивление движению, противоуклон выходной части сортировочного парка

Для цитирования: Климов А. А. Исследование элемента продольного профиля «противоуклон» в выходной части сортировочного парка // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 5 (77). С. 50–58. DOI 10.52170/1815-9265_2025_77_50.

Original article

Study of the longitudinal profile element ‘anti-slope’ in the output part of the marshalling yard

Aleksandr A. Klimov

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia, a-aklimov@yandex.ru

Abstract. The design of the longitudinal profile element of the output part of the marshalling yard – ‘anti-slope’ has been studied. The retrospective of changes in regulatory requirements for the longitudinal profile element ‘anti-slope’ in the output part of the useful length of the marshalling tracks has been considered. The current standards for the design of the ‘anti-slope’ and the results of modern scientific research on the configuration of the longitudinal profile of the sorting tracks have been analyzed, and the factors affecting the length and slope of this profile element have been determined. The rolling of detached trains of various lengths in the sorting yard has been simulated, and the results have been used to compare different designs for the ‘anti-slope’ element of the longitudinal profile. Experiments on rolling off of detachments in the marshalling yard were carried out using a simulation model developed with the author's participation. When modeling, the existing values of the main specific resistance to the movement of wagons when rolling down the hill, as well as the ‘new’ values of the main resistance obtained as a result of studies carried out with the author's participation, were used. A list of technological tasks has been formulated, the solution of which is expedient to produce when determining the configuration of the output part of the longitudinal profile of the sorting parks when designing new or reconstructing existing sorting hills. It has been

established that the length and value of the slope of the longitudinal profile element 'counter-slope' must be established by calculation for each specific sorting hill using the provisions of the methodology outlined in this article. In this case, it is necessary to take into account the following factors: the configuration of the longitudinal profile of the gravity hump tracks, the availability and technical characteristics of the means for regulating the speed of derailment, the meteorological conditions of the station's location, the structure of the processed wagon and derailment flow, and the maximum length restrictions for derailed wagons.

Keywords: gravity hump, modeling of derailment, main specific resistance to movement, anti-slope of the output part of the marshalling yard

For citation: Klimov A. A. Study of the longitudinal profile element 'anti-slope' in the output part of the marshalling yard. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(77):50–58. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_77_50.

Введение

Потребность в решении задачи исключения ухода вагонов за пределы полезной длины сортировочных путей возникла практически сразу после начала строительства и эксплуатации первых сортировочных устройств. Устройство элемента продольного профиля «противоуклон» в выходной части сортировочных путей стало логичным решением, направленным на снижение энергии движения отцепов с хорошими ходовыми качествами за счет использования профильной высоты рассматриваемого участка пути. При этом длина и значение уклона рассматриваемого элемента продольного профиля определялись с учетом ходовых характеристик подвижного состава в соответствующий момент времени.

Так, в Правилах и нормах проектирования сортировочных устройств 1948 г. [1], когда еще эксплуатировались вагоны на подшипниках скольжения, противоуклон устраивался на последней трети длины сортировочного пути со значением уклона 2,0 ‰. В Правилах и нормах проектирования сортировочных устройств 1961 г. [2] уже рекомендовалось устраивать противоуклон в последней трети сортировочного парка (СП) примерно на протяжении 150–200 м полезной длины сортировочных путей и снова со значением уклона 2,0 ‰.

Современные требования к конфигурации выходной части СП были фактически сформулированы в Правилах и нормах проектирования сортировочных устройств 1992 г. [3], которые предписывали длину элемента «противоуклон» устанавливать на протяжении последних 100 м сортировочного пути со значением уклона 2,0 ‰. Согласно действующим нормативам [4], требования к данному элементу продольного профиля практически сохранились, при этом длину противоуклона можно устанавливать с учетом местных условий в диапазоне 100–150 м.

Необходимо отметить, что уклон рассматриваемого элемента не менялся в указанных выше нормативах, корректировалось только значение длины противоуклона. При этом в нормах отсутствуют методические рекомендации по определению параметров данного элемента продольного профиля расчетным путем, которые установлены одинаковыми для всех СП сети железных дорог.

В связи с этим возникает вопрос о соответствии требований правил и норм проектирования элемента «противоуклон» современным условиям работы. Во-первых, на многих станциях в процессе эксплуатации возникают искажения продольного профиля СП и существенные отклонения от проектного положения, что приводит к нарушениям программы роспуска, выполнению дополнительной маневровой работы и снижению качества процесса заполнения путей накопления в целом [5, 6].

Во-вторых, в силу имеющихся особенностей для каждой конкретной сортировочной горки потребная конфигурация элементов продольного профиля спускной части горки и сортировочного парка (в том числе элемента «противоуклон») должна устанавливаться расчетом. При этом должны учитываться следующие факторы:

- техническое оснащение и конфигурация продольного профиля горки и СП;
- метеорологические условия местности расположения станции и ориентация оси сортировки относительно розы ветров;
- структура перерабатываемого вагонопотока: для горок, перерабатывающих порожний вагонопоток потребная профильная высота элемента «противоуклон» будет меньше, чем для горок, перерабатывающих смешанный или груженный вагонопоток, в составе которого имеются отцепы из одиночных вагонов, соответствующих характеристикам «очень хороших» расчетных бегунов.

Кроме того, на эксплуатируемых станциях не всегда можно обеспечить полное соответствие установленных значений длины и уклонов элемента «противоуклон» выходной части парка в поперечном профиле [7]. На отдельных станциях, вследствие исторического развития, обеспечение значения противоуклона на уровне 2,0 % может привести к значительным капитальным затратам при реконструкции, связанным с необходимостью выправки продольного профиля всей выходной горловины СП и вытяжных путей расформирования, а также соблюдения габаритов приближения строений. Поэтому на многих станциях имеются несоответствия параметров элемента продольного профиля «противоуклон» нормативным требованиям, что повышает вероятность возникновения случаев нарушения безопасности маневровой работы вследствие возможного выхода подвижного состава за пределы полезной длины пути.

В результате с 2018 г. в ОАО «РЖД» функционирует инструкция о необходимости формирования «барьерных» групп для обеспечения безопасности сортировочного процесса в определенных условиях эксплуатации (Методика определения величины «барьерных групп» вагонов для установки перед роспуском на свободных путях сортировочных парков и расчета норм закрепления «барьерных групп», утвержденная распоряжением ОАО «РЖД» от 2 февраля 2018 г. № 102р). Кроме того, для повышения безопасности маневровой работы при расформировании составов разрабатываются и внедряются специальные технические средства закрепления подвижного состава в выходной горловине СП, в том числе устройства для автоматического заграждения сортировочных путей [8, 9].

Исследованиям параметров элемента «противоуклон» выходной части сортировочных путей посвящены работы [10, 11], в которых предлагается оценивать конфигурацию продольного профиля парка через коэффициент качества заполнения сортировочного пути, а также произведена оценка влияния смещения точек перелома профиля на процесс накопления составов.

Таким образом, сегодня действуют унифицированные нормативные требования к значениям длины и уклона элемента продольного профиля «противоуклон» в выходной части сортировочных путей для всех сортировоч-

ных горок сети. При этом задача определения данных параметров расчетным путем с учетом специфики расположения станции и других особенностей технического оснащения и технологии работы горки является актуальной на современном этапе развития теории горочных расчетов.

Материалы и методы исследования

Длина и значение элемента продольного профиля «противоуклон» должны обеспечивать исключение возможности выхода за пределы полезной длины сортировочных путей:

1) отцепов, скатывающихся на свободный путь;

2) отцепов, скатывающихся на сортировочный путь со стоящей группой вагонов (в том числе «барьерной» группой) при соединении (соударении) вагонов с дальнейшим проталкиванием объединенной группы по направлению скатывания отцепа.

Необходимо отметить, что в обоих случаях должны использоваться дополнительные технические средства, исключающие возможность продвижения вагонов за пределы полезной длины пути. В первом случае предусматривается:

- укладка охранных башмаков;
- устройство специальных заграждающих технических средств.

Во-втором случае длина (число вагонов) и масса «барьерной» группы определяются расчетом по методике [12, 13], учитывающей в том числе конфигурацию продольного профиля выходной части СП.

Для определения рациональных потребных параметров элемента продольного профиля «противоуклон» целесообразно не учитывать наличие дополнительных технических средств или «барьерных» групп в выходной части сортировочного пути. В данном случае торможение отцепов, имеющих высокие скорости движения в выходной части парка, будет производиться за счет действия профильной высоты элемента «противоуклон» $h_{пр}$, суммарного удельного сопротивления движению неуправляемых сил $w_{сум}$ и удельного сопротивления от торможения на охранных башмаках $w_т$.

При этом неуправляемые силы сопротивления действуют на протяжении всей длины элемента «противоуклон» $l_{пр}$, а сила торможения – в пределах участка $l_{тб}$, согласно схеме

укладки охранных башмаков (в данном случае принимается силовое воздействие от одного тормозного башмака, так как второй башмак (ТБ2) укладывается на тот же рельс для использования в случае невыполнения первым башмаком (ТБ1) функций торможения по различным причинам). В результате работу силы торможения следует учитывать для предельного случая – только при использовании ТБ2 в пределах участка $l_{ТБ} = 25$ м. При этом учитываются следующие особенности функционирования немеханизированных тормозных позиций, изложенные в «Пособии по применению правил и норм проектирования сортировочных устройств» 1994 г. (авторы Ю. А. Муха, Л. Б. Тишков, В. П. Шейкин и др.):

- максимальная длина юза не должна превышать 20 м;

- торможение отцепов производится в пределах 80 % длины, следовательно, работу от торможения на ТБ2 следует принимать в пределах участка $l_T = 20 \cdot 0,8 = 16$ м.

Принципиальная схема возможного прохождения отцепом элемента «противоуклон» по условию его остановки на предельном столбике с учетом указанных особенностей торможения приведена на рис. 1.

Согласно рис. 1 потребные параметры элемента «противоуклон» зависят от начальной скорости входа отцепов, а остановка отцепов в пределах полезной длины сортировочного пути будет обеспечена при выполнении условия

$$h_w \geq h_{вх} - h_{пр}, \quad (1)$$

где h_w – работа всех сил сопротивления движению при прохождении отцепом элемента «противоуклон», м эн. в.; $h_{вх}$ – суммарный запас энергии движения отцепа при входе на элемент продольного профиля «противоуклон», м эн. в.

В данном случае работа удельных сил сопротивления движению отцепа определяется по формуле

$$h_w = (w_{сум} l_{пр} + w_T l_T) \cdot 10^{-3}. \quad (2)$$

Удельное сопротивление движению отцепа при торможении на тормозном башмаке w_T , Н/кН, составляет

$$w_T = f_T \frac{n_T}{n} \cdot 10^3, \quad (3)$$

где f_T – удельная сила тормозного действия башмака (коэффициент трения), принимается 0,17, с возможным отклонением $\pm 0,03$; n_T – число подложенных башмаков (тормозимых осей); n – число осей в отцепе.

Следовательно, для каждого рассматриваемого варианта конструкции противоуклона можно определить предельно допустимое значение скорости входа отцепов на данный элемент продольного профиля:

$$v_{вх} = \sqrt{(w_{сум} l_{пр} + f_T \frac{n_T}{n} \cdot 10^3 l_T + i_{пр} l_{пр}) \cdot 2g' \cdot 10^{-3}}, \quad (4)$$

где $i_{пр}$ – уклон элемента «противоуклон», ‰; g' – ускорение свободного падения с учетом инерции вращающихся частей вагонов, м/с².

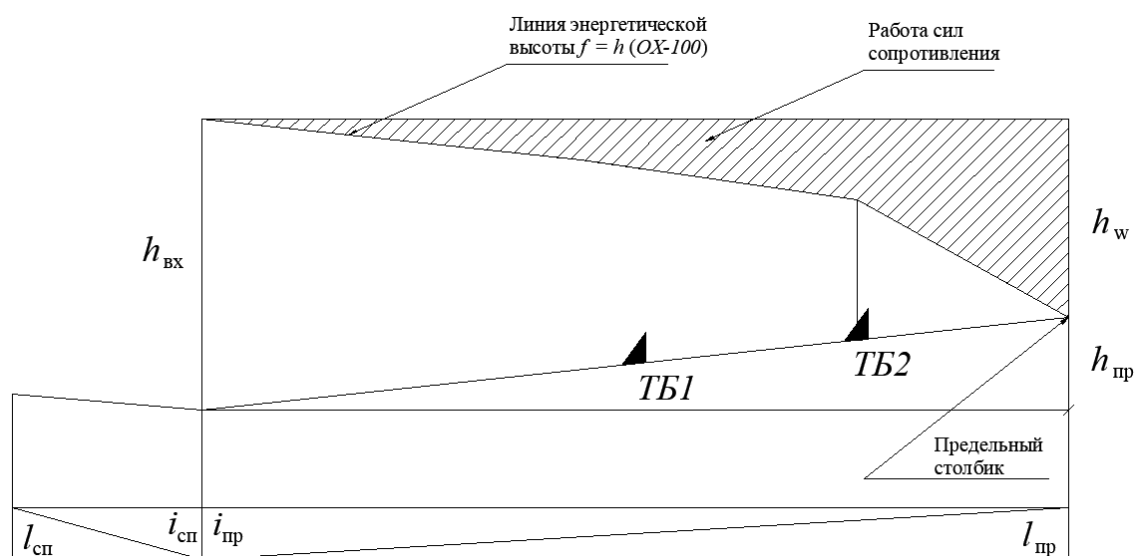


Рис. 1. Принципиальная схема возможного прохождения отцепом элемента «противоуклон» при его остановке на предельном столбике

Проверка выполнения условия (4) для каждого варианта конфигурации выходной части сортировочного пути должна выполняться по результатам имитационного моделирования скатывания отцепов для следующих условий:

- принимаются существующие или проектные параметры плана и продольного профиля основной части сортировочного пути;
- для скатывания принимаются груженные вагоны тяжелой весовой категории, имеющие лучшие ходовые характеристики по сравнению с вагонами других весовых категорий;
- максимально допустимое число вагонов принимается с учетом соответствующего ограничения, установленного для конкретной сортировочной горки;
- для одиночных вагонов значение $w_{\text{осн}}$ следует принимать по данным, установленным для «очень хорошего» расчетного бегуна (ОХ-100), для отцепов из нескольких вагонов рекомендуется принимать средние значения основного удельного сопротивления для тяжелой весовой категории;
- расчет производится для благоприятных условий скатывания;
- расчет торможения от охранных башмаков производится для одного тормозного башмака.

Если по результатам расчетов условие (1) не выполняется, то необходимо принимать решение об оборудовании в выходной части СП загрязжающих устройств или использовании «барьерных» групп, устанавливаемых перед началом накопления очередного состава.

Согласно выражению (4) потребные параметры элемента «противоуклон» зависят от начальной скорости входа отцепов на рас-

считываемый участок, которая, в свою очередь, зависит от ряда случайных факторов. Расчет скорости входа отцепов на элемент продольного профиля «противоуклон» производился на основании имитационного моделирования скатывания отцепов с использованием программы «Скат-отцеп», разработанной специалистами СГУПС [14]. При этом учитывается длина отцепа, а расчет дальности пробега выполняется для скорости выхода с парковой тормозной позиции (ПТП), установленной по последней оси отцепа. Расчетная схема предельного расположения отцепа из нескольких вагонов на элементе «противоуклон» в пределах полезной длины сортировочного пути приведена на рис. 2.

Кроме того, в расчетах скорости скатывания и дальности пробега отцепов в СП учитывались как существующие значения основного удельного сопротивления движению вагонов $w_{\text{осн}}$ [15], так и «новые» значения сопротивления, определенные на основании исследований, выполненных специалистами СГУПС [16] с использованием статистических данных комплекса «Компьютерное зрение», разработанного специалистами ростовского филиала АО «НИИАС» [17].

Для исследования приняты параметры продольного профиля реальной сортировочной горки, расположенной в Западной Сибири.

Результаты исследования

Результаты моделирования скатывания отцепов, состоящих из груженных вагонов, для различных значений скорости выхода с ПТП (измеряемой по последней оси отцепа) приведены в табл. 1 и на рис. 3. При этом значения

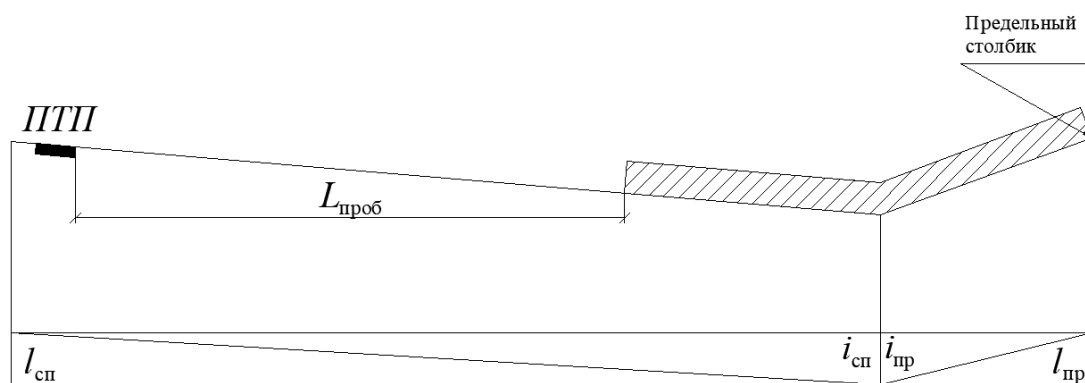


Рис. 2. Расчетная схема предельного расположения отцепа из нескольких вагонов на элементе «противоуклон» в пределах полезной длины СП

Таблица 1

Значения дальности пробега отцепов из груженных вагонов различной длины при благоприятных условиях, м

Скорость выхода отцепа с ПТП, м/с	Число вагонов в отцепе				
	1	2	5	10	15
	Предельная дальность				
	1 040	1 026	984	914	844
0,50	954	942	916	876	828
0,75	959	947	922	883	838
1,00	967	955	930	893	844 (0,43 м/с)
1,40	984	973	949	912	844 (1,04 м/с)
2,00	1 023	1 012	984 (0,50 м/с)	914 (1,35 м/с)	844 (1,74 м/с)
3,00	1 040 (1,99 м/с)	1 026 (2,06 м/с)	984 (2,26 м/с)	914 (2,60 м/с)	844 (2,82 м/с)
5,00	1 040 (4,40 м/с)	1 026 (4,45 м/с)	984 (4,56 м/с)	914 (4,74 м/с)	844 (4,87 м/с)

Примечание. В скобках указана скорость движения отцепа в точке, соответствующей предельной дальности пробега.

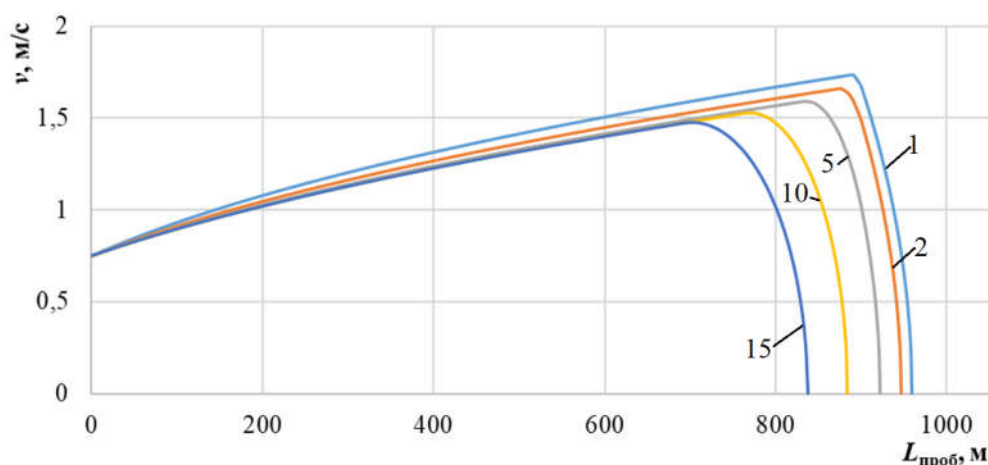


Рис. 3. Графики изменения скорости движения отцепов различной длины (1, 2, 5, 10, 15 вагонов), измеряемой по последней оси отцепа при выходе с ПТП со скоростью 0,75 м/с

предельно возможной дальности пробега отцепа, измеряемой от нижнего стыка ПТП до точки расположения последней оси отцепа, определены по условию его невыхода за пределы полезной длины сортировочного пути согласно расчетной схеме (см. рис. 2). Значение уклона основной части сортировочного пути принято в соответствии с нормативными требованиями – 0,6 ‰. Значение сопротивления $w_{осн}$ принято для каждого вагона в отцепе согласно существующим значениям на уровне 0,5 Н/кН, что соответствует значению для расчетного бегуна ОХ-100.

Полученные результаты показывают, что для всех рассматриваемых отцепов в приня-

тых условиях проведения экспериментов обеспечивается достижение элемента «противоуклон» в выходной горловине парка при скорости выхода с ПТП, равной 3,0 м/с и более. Также рассмотрены варианты выхода отцепов в парк с учетом максимально допустимой скорости входа на ПТП (в данном случае 6,0 м/с), при этом расчет сделан как для существующих (0,5 Н/кН), так и для «новых» (0,1 Н/кН) значений $w_{осн}$ (для каждого вагона в отцепе). Расчет выполнен для вариантов конструкции элемента продольного профиля «противоуклон», приведенных в табл. 2. Результаты моделирования скатывания отцепов различной длины указаны в табл. 3.

Таблица 2

Варианты конструкции элемента продольного профиля «противоуклон»

Вариант	Длина, м	Уклон, ‰
1	100	2,0
2	150	2,0
3	100	1,5
4	150	1,5
5	100	1,0
6	150	1,0

Таблица 3

Скорость скатывания последней оси отцепа в точке предельной дальности пробега для существующих (0,5 Н/кН) / «новых» (0,1 Н/кН) значений $w_{\text{осн}}$ м/с

Вариант	Число вагонов в отцепе				
	1	2	5	10	15
1	5,685 / 6,333	5,741 / 6,380	5,837 / 6,448	5,961 / 6,520	6,006 / 6,521
2	5,462 / 6,134	5,519 / 6,182	5,620 / 6,251	5,770 / 6,346	5,879 / 6,404
3	5,764 / 6,404	5,813 / 6,446	5,893 / 6,497	5,991 / 6,547	6,026 / 6,539
4	5,587 / 6,245	5,637 / 6,287	5,719 / 6,340	5,838 / 6,408	5,924 / 6,445
5	5,842 / 6,475	5,885 / 6,510	5,947 / 6,547	6,021 / 6,575	6,045 / 6,557
6	5,710 / 6,355	5,753 / 6,391	5,816 / 6,428	5,905 / 6,469	5,968 / 6,486

Примечание. Результаты моделирования скатывания отцепов различной длины определены для максимальной скорости выхода с ПТП (6,0 м/с) при благоприятных условиях.

Полученные результаты показывают, что в экстренной ситуации (при выходе отцепов в парк с максимальным значением скорости) во всех случаях возникает потребность в снижении их скорости движения. При использовании охранного башмака указанные в табл. 3 скорости входа на противоуклон будут превышать допустимую скорость входа на тормозной башмак (3,5 м/с).

При выходе отцепа с ПТП со скоростями, обеспечивающими достижение потребной дальности пробега, необходимо выполнять проверку возможности остановки отцепа при торможении на башмаке с использованием формулы (4). Для рассматриваемого примера значения допустимых скоростей входа на тормозной башмак составят:

– для отцепов из 15 4-осных вагонов массой 100 т каждый:

$$v_{\text{вх}} = \sqrt{0,17 \cdot \frac{1}{60} \cdot 10^3 \cdot 16 \cdot 2 \cdot 9,65 \cdot 10^{-3}} = 0,94 \text{ м/с};$$

– для отцепов из 10 4-осных вагонов массой 100 т каждый:

$$v_{\text{вх}} = \sqrt{0,17 \cdot \frac{1}{40} \cdot 10^3 \cdot 16 \cdot 2 \cdot 9,65 \cdot 10^{-3}} = 1,15 \text{ м/с}.$$

Необходимо отметить, что приведенный пример расчета выполнен для предельно возможных условий проведения эксперимента, когда все вагоны в отцепе имеют максимальную массу и минимальные значения сопротивления $w_{\text{осн}}$. В реальных условиях эксплуатации сочетание указанных условий с максимально допустимыми скоростями выхода отцепов с ПТП крайне маловероятно, поэтому аналогичную задачу правильнее рассматривать для средних значений $w_{\text{осн}}$. Если для рассматриваемой горки не будет обеспечиваться остановка отцепов максимальной длины при торможении одним башмаком на элементе «противоуклон», то следует предусматривать дополнительные меры и технические средства обеспечения безопасности маневровой работы при расформировании составов.

Выводы

Результаты выполненного исследования показали, что параметры элемента продольного профиля «противоуклон» в выходной части СП могут определяться расчетом для каждой конкретной сортировочной горки с учетом ее конструкции, технического оснащения, технологии работы и метеорологических условий местности расположения станции.

Список источников

1. Технические указания на проектирование станций и узлов : утверждены МПС СССР 24.11.1947 / ВНИИЖТ. Москва : Трансжелдориздат, 1948. 124 с.
2. Технические указания по проектированию станций и узлов на железных дорогах общей сети Союза ССР : ВСН 56-61 : утверждены МПС СССР 12.06.1961. Москва : Трансжелдориздат, 1961. 151 с.
3. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах Союза ССР : ВСН 207-89 / МПС СССР. Москва : Транспорт, 1992. 104 с.
4. СП 119.13330.2024. Железные дороги колеи 1520 мм : утверждены приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ 01.07.2024 № 432/пр. Москва, 2024. 188 с.
5. Кобзев В. А., Шмаль С. Н. Влияние дефектов продольного профиля сортировочных горок на роспуск и качество сортировочного процесса // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте (ИСУЖТ-2013) : труды Второй научно-технической конференции, Москва, 21–22 октября 2013 года. Москва : Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте, 2013. С. 169–173.
6. Корниенко К. И. Исследование влияния профиля сортировочного парка на скорость движения отцепа // Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика : материалы XLI Международной научно-практической конференции, Алматы, Казахстан, 03–04 апреля 2017 года / под редакцией Б. М. Ибраева. Том 1. Алматы : Казахская академия транспорта и коммуникаций имени М. Тынышпаева, 2017. С. 11–15.
7. Хаджимухаметова М. А. Современный подход к формированию поверхности и элементов профилей сортировочной горки // Universum: технические науки. 2021. № 1-1 (82). С. 50–56.
8. Пасичный А. Н. Обзор современных технических средств для закрепления подвижного состава на станционных путях // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. 2013. № 2. С. 80–85.
9. Автоматизация заграждения сортировочных путей в концепции Цифровой железнодорожной станции / И. А. Ольгейзер, В. Н. Соколов, А. Л. Юндин, К. И. Корниенко // Автоматика, связь, информатика. 2023. № 11. С. 2–5.
10. Корниенко К. И. Влияние изменения величины и длины противоуклона в конце пути сортировочного парка на качество его заполнения при расформировании составов // Транспорт Урала. 2019. № 1 (60). С. 66–70.
11. Корниенко К. И., Бессоненко С. А. Влияние изменения продольного профиля пути сортировочного парка на качество его заполнения // Политранспортные системы : материалы X Международной научно-технической конференции, Новосибирск, 15–16 ноября 2018 года. Новосибирск : Сибирский государственный университет путей сообщения, 2019. С. 173–177.
12. Коваленко Н. А., Бородин А. А., Тарасов К. А. Факторы, определяющие величину и нормы закрепления «барьерных групп» // Мир транспорта. 2019. Т. 17, № 6 (85). С. 242–257.
13. Коваленко Н. А., Бородин А. А. Метод определения удерживающей способности заграждающих средств, обеспечивающих безопасность процесса расформирования составов // Наука и техника транспорта. 2020. № 2. С. 48–55.
14. Свидетельство о регистрации электронного ресурса ОФЭРНИО. Программа имитационного моделирования скатывания отцепов из нескольких вагонов с сортировочной горки «СКАТ-Отцеп» : № 18663 : заявл. 12.11.2012 / Гунбин А. А., Климов А. А.
15. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах колеи 1520 мм : утверждены МПС РФ 10.10.03. Москва : Техинформ, 2003. 168 с.
16. Исследование параметров основного удельного сопротивления движению вагонов при скатывании с сортировочной горки / С. А. Бессоненко, А. А. Гунбин, А. А. Климов [и др.] // Известия Транссиба. 2023. № 1 (53). С. 53–62.
17. Компьютерное зрение для контроля занятости сортировочных путей / А. Е. Хатламаджиян, В. В. Борисов, И. А. Ольгейзер, А. В. Суханов // Автоматика, связь и информатика. 2021. № 3. С. 8–11.

References

1. Technical Specifications for the Design of Stations and Junctions. Approved by Ministry of Railways of the USSR 24.11.1947. All-Union Research Institute of Railway Engineering. Moscow: Transzheldorizdat; 1948. 124 p. (In Russ.).
2. Technical Instructions for the Design of Stations and Junctions on the General Network of the USSR Railways: VSN 56-61. Approved by the USSR Ministry of Railways 12.06.61. Moscow: Transzheldorizdat; 1961. 151 p. (In Russ.).
3. Rules and Regulations for the Design of Sorting Devices on the Railways of the USSR: VSN 207-89. Ministry of Railways of the USSR. Moscow: Transport; 1992. 104 p. (In Russ.).

4. SP 119.13330.2024. Railways of 1520 mm gauge. Approved by order of the Ministry of Construction and Housing and Public Utilities of the Russian Federation 01.07.24 No. 432/ave. Moscow; 2024. 188 p. (In Russ.).
5. Kobzev V. A., Shmal S. N. Influence of defects of longitudinal profile of marshalling hills on dissolution and quality of marshalling process. *Intelligent Control Systems in Railway Transport (ISUZhT-2013). Proceedings of the Second Scientific and Technical Conference, Moscow, October 21–22, 2013*. Moscow: Research and Design Institute of Informatization, Automation, and Communications in Railway Transport; 2013. P. 169–173. (In Russ.).
6. Kornienko K. I. Research of the Sorting Yard Profile Influence on the Speed of the Detachment. *Innovative Technologies in Transport: Education, Science, and Practice. Proceedings of the XLI International Scientific and Practical Conference, Almaty, Kazakhstan, April 03–04, 2017*. Edited by B. M. Ibraev. Volume 1. Almaty: M. Tynyshpayev Kazakh Academy of Transport and Communications; 2017. P. 11–15. (In Russ.).
7. Khadzhimukhametova M. A. Modern Approach to the Formation of the Surface and Profile Elements of a Sorting Hill. *Universum: Technical Sciences*. 2021;(82):50–56. (In Russ.).
8. Pasichny A. N. Overview of Modern Technical Means for Fixing Rolling Stock on Station Tracks. *Proceedings of the Rostov State Transport University*. 2013;(2):80–85. (In Russ.).
9. Olgeizer I. A., Sokolov V. N., Yundin A. L., Kornienko K. I. Automation of Sorting Track Barriers in the Digital Railway Station Concept. *Automation, Communications, and Computer Science*. 2023;(11):2–5. (In Russ.).
10. Kornienko K. I. Influence of the change in the magnitude and length of the counter-slope at the end of the sorting yard track on the quality of its filling during the disbandment of trains. *Transport of the Urals*. 2019;(60):66–70. (In Russ.).
11. Kornienko K. I., Bessonenko S. A. Influence of the longitudinal track profile change of the marshalling yard on the quality of its filling. *Polytransport Systems. Proceedings of the X International Scientific and Technical Conference, Novosibirsk, November 15–16, 2018*. Novosibirsk: Siberian Transport University; 2019. P. 173–177. (In Russ.).
12. Kovalenko N. A., Borodin A. A., Tarasov K. A. Factors Determining the Size and Standards of Fixing ‘Barrier Groups’. *World of Transport*. 2019;17(85):242–257. (In Russ.).
13. Kovalenko N. A., Borodin A. A. Method for Determining the Retention Capacity of Barriers that Ensure the Safety of the Disbandment Process. *Science and Technology of Transport*. 2020;(2):48–55. (In Russ.).
14. Gunbin A. A., Klimov A. A. Certificate of registration of the electronic resource OFERNIO. Program of simulation modeling of rolling of detachments from several wagons from the sorting hill ‘SKAT-Detachment’: No. 18663 dated 12.11.2012. (In Russ.).
15. Rules and norms for the design of marshalling devices on 1520 mm gauge railways. Approved by the Ministry of Railways of the Russian Federation 10.10.03. Moscow: Tekhinform; 2003. 168 p. (In Russ.).
16. Bessonenko S. A., Gunbin A. A., Klimov A. A. [et al.]. Research of the Parameters of the Main Specific Resistance to the Movement of Cars When They Roll Down a Sorting Hill. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2023;(53):53–62. (In Russ.).
17. Khatlamadzhian A. E., Borisov V. V., Olgeizer I. A., Sukhanov A. V. Computer Vision for Monitoring the Occupancy of Sorting Tracks. *Automation, Communication and Informatics*. 2021;(3):8–11. (In Russ.).

Информация об авторе

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

Information about the author

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

Статья поступила в редакцию 06.11.2025; одобрена после рецензирования 17.11.2025; принята к публикации 18.11.2025.

The article was submitted 06.11.2025; approved after reviewing 17.11.2025; accepted for publication 18.11.2025.

Научная статья
УДК 621.923.1
doi:10.52170/1815-9265_2025_77_59

Обеспечение организационно-технологической надежности производственного процесса шлифования рельсов

Владимир Константинович Милорадович¹, Андрей Степанович Ильиных²,
Елена Олеговна Юркова³, Владимир Алексеевич Аксенов⁴, Мария Андреевна Култан^{5✉}

^{1, 2, 3, 5} Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

⁴ Российский университет транспорта, Москва, Россия

¹ MiloradovichVK@rpm-group.ru

² asi@stu.ru

³ eoyurk@mail.ru

⁴ vl.aksenov@yandex.ru

⁵ kultanma@yandex.ru✉

Аннотация. В статье представлены результаты комплексного исследования организационно-технологической надежности процесса шлифования рельсов. Анализ эксплуатируемого парка рельсошлифовальных поездов, нормативной базы, оперативного планирования работ и оценки их качества позволил выявить ключевую проблему, заключающуюся в низкой организационно-технологической надежности процесса. Это ведет к ухудшению качества работ, росту эксплуатационных расходов, снижению безопасности движения и рискам срыва графика выполнения работ.

Методология основана на детальном картировании производственных операций, анализе загрузки персонала и применении FMEA-анализа для экспертной оценки процесса. Картирование производственных операций на различных участках проводилось с привлечением экспертной группы, включавшей представителей эксплуатационных бригад, сервисных организаций, контролеров качества и разработчиков техники. В процессе обследования трех поездов был выявлен ряд конструкционных, системных и технологических проблем. Анализ хронометража показал фактическую длительность шлифования, соотношение вспомогательных операций, рабочего времени и загрузки бригады. Для количественной оценки надежности процесса шлифования был проведен FMEA-анализ с привлечением экспертов. Риски ранжированы по приоритетному числу риска. Построенная матрица рисков позволила выявить критические операции. Имитационное моделирование способствовало обнаружению значительных рисков нарушения безопасности движения и «оконой» дисциплины. На основе оперограмм процесса шлифования рельсов разработана сетевая модель шлифования и проведен машинный эксперимент, состоящий из 1 000 повторений.

Результаты исследований показали необходимость пересмотра организационно-технологических решений для повышения надежности и эффективности процесса шлифования рельсов. Предложенный ряд мер позволит повысить надежность, качество и эффективность процесса шлифования рельсов.

Ключевые слова: рельсошлифовальный поезд, технологическое «окно», нормативно-техническая документация, картирование производственных операций, FMEA-анализ, имитационное моделирование, организационно-технологическая надежность

Для цитирования: Обеспечение организационно-технологической надежности производственного процесса шлифования рельсов / В. К. Милорадович, А. С. Ильиных, Е. О. Юркова, В. А. Аксенов, М. А. Култан // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 5 (77). С. 59–71. DOI 10.52170/1815-9265_2025_77_59.

Original article

Ensuring the organizational and technological reliability of the rail grinding process

Vladimir K. Miloradovich¹, Andrey S. Ilinykh², Elena O. Yurkova³,
Vladimir A. Aksenov⁴, Maria A. Kultan^{5✉}

^{1, 2, 3, 5} Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

⁴ Russian University of Transport, Moscow, Russia

¹ MiloradovichVK@rpm-group.ru

² asi@stu.ru

³ eoyurk@mail.ru

⁴ vl.aksenov@yandex.ru

⁵ kultanma@yandex.ru✉

Abstract. This article presents the results of a comprehensive research on the organizational and technological reliability of the rail grinding process. It includes an analysis of the current fleet of rail grinding trains, the regulatory framework, operational planning, and quality assessment revealed a key problem: the low organizational and technological reliability of the process. This leads to poor work quality, increased operating costs, reduced traffic safety, and the risk of delays in completing the work.

The methodology is based on detailed mapping of production operations, personnel workload analysis, and the use of FMEA analysis for expert process evaluation. Mapping of production operations in various sections was carried out with the involvement of an expert group that included representatives of operating teams, service organizations, quality controllers, and equipment developers. During the survey of three trains, a number of design, system, and technological issues were identified. The time analysis showed the actual duration of grinding, the ratio of auxiliary operations, working time, and team workload. To quantify the reliability of the grinding process, an FMEA analysis was conducted with the involvement of experts. The risks were ranked according to their priority. The constructed risk matrix identified 'critical' operations. Simulation modeling was performed, revealing significant risks of traffic safety violations and 'window' discipline. Based on the operation programs of the rail grinding process, a network model of grinding was developed, and a machine experiment consisting of 1,000 repetitions was conducted.

The research results demonstrated the need to revise organizational and technological solutions to improve the reliability and efficiency of the rail grinding process. The proposed set of measures will improve the reliability, quality, and efficiency of the rail grinding process.

Keywords: rail grinding train, process 'window', normative and technical documentation, mapping of production operations, FMEA analysis, simulation modeling, organizational and technological reliability

For citation: Miloradovich V. K., Ilinykh A. S., Yurkova E. O., Aksenov V. A., Kultan M. A. Ensuring the organizational and technological reliability of the rail grinding process. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(77):59–71. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_77_59.

Введение

Эксплуатация рельсошлифовальных поездов (РШП) в России началась с вводом в строй первого состава РШП-48 № 001 в 1999 г. [1–7]. На текущий момент парк насчитывает 19 единиц техники, распределенных по различным железным дорогам.

Согласно нормативно-технической документации (НТД) по шлифованию рельсов [8], за жизненный цикл рельса должно выполняться до восьми шлифовок (шесть профилактических и две профильные). При этом данные за 2012–2024 гг. свидетельствуют о существенном разрыве между нормативной потребностью (не менее 198 тыс. км в год) и фактическим объемом выполняемых работ, который варьируется от 18 до 56 тыс. км (табл. 1).

Таблица 1

Объем шлифовки рельсов в 2012–2024 гг., км

Год	Фактический объем выполненных работ
2012	45 214,00
2013	56 893,50
2014	39 928,10
2015	34 642,60
2016	33 650,30
2017	43 741,94
2018	18 609,66
2019	38 356,55
2020	33 458,26
2021	31 767,44
2022	33 041,02
2023	36 458,15
2024	32 343,04

Производство работ по шлифованию рельсов с применением РШП осуществляется в технологические «окна» – периоды, когда движение поездов на участке прекращается. Анализ продолжительности «окон» в 2021–2024 гг. (табл. 2) выявляет устойчивую тенденцию к их сокращению. Любое, даже кратковременное, прекращение движения нарушает синхронность графика, провоцируя накопление задержек и снижая пропускную способность сети. Устойчивость транспортного процесса напрямую зависит от минимизации времени закрытия железнодорожного пути. В связи с задачей повышения провозной способности, особенно на Восточном полигоне (где планируется рост перевозок на 30 %), «оконное» время стало ключевым объектом оптимизации. За указанный период количество «окон» для шлифования сократилось на 30 %, а их средняя продолжительность – на 37 %.

Критерием для назначения шлифования рельсов является превышение допустимых глубин неровностей на поверхности рельса и в элементах стрелочных переводов, нормативное количество проходов шлифовального поезда определяется видом ремонта (табл. 3) [9].

Анализ действующей НТД выявил ряд существенных пробелов, требующих дополнения:

- 1) градация приоритетности поверхностных дефектов;
- 2) критерии выбора шлифования при одновременном наличии нескольких типов дефектов;
- 3) специфика планирования работ в кривых участках пути;

Таблица 2

Продолжительность технологических «окон» за период 2021–2024 гг.

Дирекция ин-фраструктуры*	2021			2022			2023			2024		
	Кол-во «окон», шт.	Общая продолжительность, мин	Средняя продолжительность, мин	Кол-во «окон», шт.	Общая продолжительность, мин	Средняя продолжительность, мин	Кол-во «окон», шт.	Общая продолжительность, мин	Средняя продолжительность, мин	Кол-во «окон», шт.	Общая продолжительность, мин	Средняя продолжительность, мин
ОКТ	412	1 007	2,44	314	800	2,55	259	760	2,93	210	520	2,48
МОСК	445	1 158	2,60	253	628	2,48	322	606	1,88	228	476	2,09
ГОРЬК	51	122	2,40	184	393	2,13	258	538	2,09	182	369	2,03
СЕВ	273	829	3,04	242	763	3,15	318	926	2,91	249	756	3,04
С-КАВ	165	518	3,14	53	172	3,24	99	315	3,18	77	250	3,25
Ю-ВОСТ	91	270	2,97	90	256	2,85	75	154	2,05	55	168	3,07
ПРИВ	105	397	3,78	117	442	3,78	60	267	4,45	88	308	3,50
КБШ	234	552	2,36	94	209	2,22	92	272	2,96	131	324	2,48
СВЕРД	141	357	2,53	66	128	1,94	123	261	2,12	127	266	2,10
Ю-УР	152	453	2,98	164	420	2,56	145	464	3,20	100	214	2,14
З-СИБ	164	376	2,29	180	456	2,53	185	411	2,22	99	203	2,06
КРАС	153	478	3,13	146	480	3,29	98	298	3,04	59	189	3,21
В-СИБ	191	614	3,22	224	778	3,48	167	487	2,92	154	394	2,56
ЗАБ	141	416	2,95	106	360	3,39	112	379	3,38	104	268	2,58
ДВОСТ	130	373	2,87	102	288	2,82	142	396	2,79	115	285	2,48
Итого	2 848	7 920	2,84	2 335	6 572	2,82	2 455	6 533	2,66	1 989	4 997	2,59

* ОКТ – Октябрьская железная дорога; МОСК – Московская железная дорога; ГОРЬК – Горьковская железная дорога; СЕВ – Северная железная дорога; С-КАВ – Северо-Кавказская железная дорога; Ю-ВОСТ – Юго-Восточная железная дорога; ПРИВ – Приволжская железная дорога; КБШ – Куйбышевская железная дорога; СВЕРД – Свердловская железная дорога; Ю-УР – Южно-Уральская железная дорога; З-СИБ – Западно-Сибирская железная дорога; КРАС – Красноярская железная дорога; В-СИБ – Восточно-Сибирская железная дорога; ЗАБ – Забайкальская железная дорога; ДВОСТ – Дальневосточная железная дорога.

Таблица 3

Нормативное количество проходов РШП

Наименование работы	Количество проходов
1. Укладка новых рельсов	2
2. Укладка старогодных рельсов	3
3. Перекладка старогодных рельсов без ремонта	6
4. Средний ремонт железнодорожного пути	4
5. Подъемочный ремонт железнодорожного пути	4
6. Планово-предупредительная выправка	4

4) методика оценки экономической эффективности различных технологических решений при долгосрочном планировании;

5) требования к средствам контроля дефектов и интеграции данных в производственные системы ОАО «РЖД»;

6) рекомендации по последовательности формирования технологического процесса;

7) регламентация режимов шлифования (скорость, усилие прижатия круга);

8) четкие критерии выбора программ шлифования для достижения профиля, максимально приближенного к новому рельсу.

Материалы и методы исследования

Производственный процесс шлифования рельсов (рис. 1) можно укрупненно разделить на этапы: планирование, логистика РШП, производство работ и контроль качества. Результативность каждого этапа непосредственно влияет на общее качество процесса.

Целевые параметры качества шлифования (рис. 2) включают:

- 1) достижение требуемой шероховатости поверхности;
- 2) формирование заданного поперечного профиля;
- 3) полное устранение всех дефектов;
- 4) выполнение объема работ в отведенное «оконное» время.

В период 2021–2024 гг. средняя продолжительность «окна» для РШП составила 2,75 ч, что на 45,8 % меньше оптимальных 6 ч (рис. 3). Это приводит к систематическому срыву запланированных объемов работ: доля невыявленных (скрытых) дефектов достигает 37–50 %, а непроизводственные потери, связанные с передислокацией поездов, составляют 42,2 %.

На основании проведенного анализа можно сформулировать следующие выводы:

1. Существует объективное противоречие между требованием сокращения длительно-

сти «окон» и необходимостью сохранения не-снижаемых объемов производства.

2. Требуемое качество работ не достигается из-за отсутствия четких регламентов выбора программы шлифования и высокой доли субъективного фактора.

3. Действующая НТД не предусматривает вариативности решений для долгосрочного планирования и не содержит методик оценки их экономической эффективности.

4. Процесс сильно подвержен внешним воздействиям, снижающим его результативность.

5. Значительный объем скрытых дефектов свидетельствует о неполном достижении целевых показателей качества.

Таким образом, ключевая проблема заключается в низкой организационно-технологической надежности процесса, что ведет к ухудшению качества работ, росту эксплуатационных расходов, снижению безопасности движения и рискам срыва графика выполнения работ.

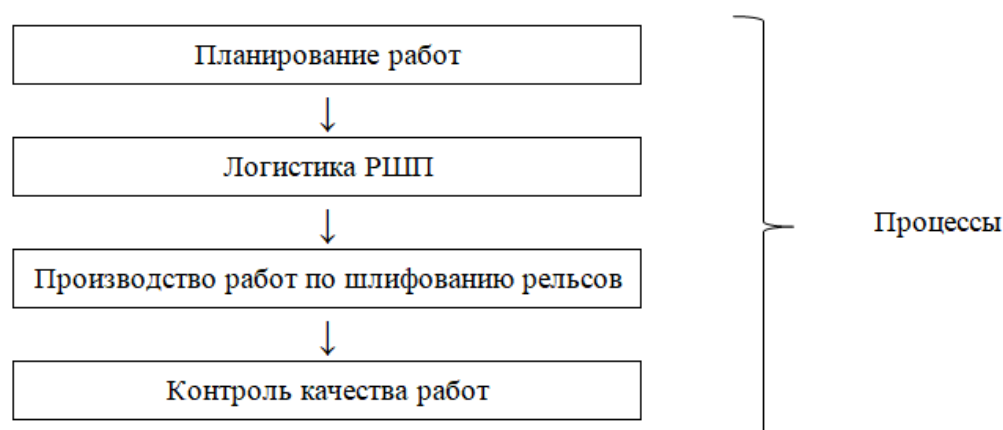


Рис. 1. Укрупненный производственный процесс

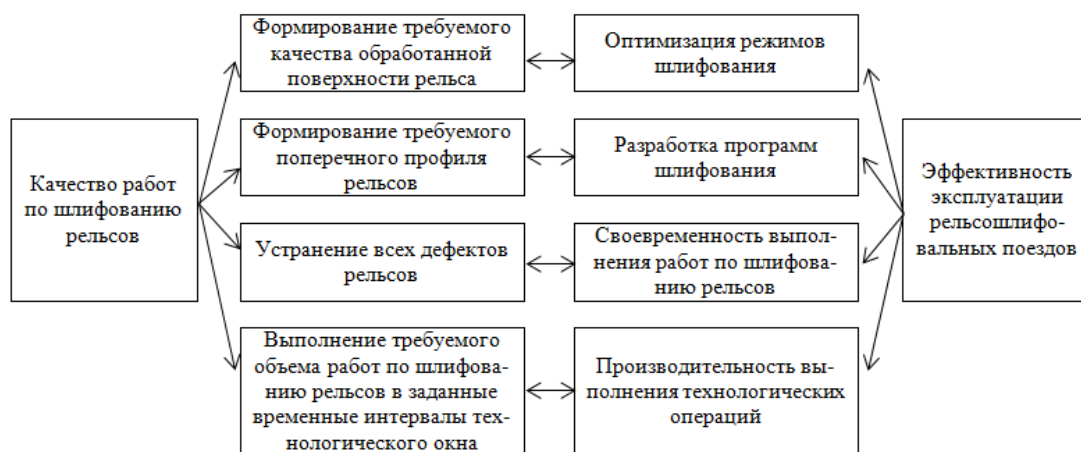


Рис. 2. Результаты шлифования и эффективность эксплуатации

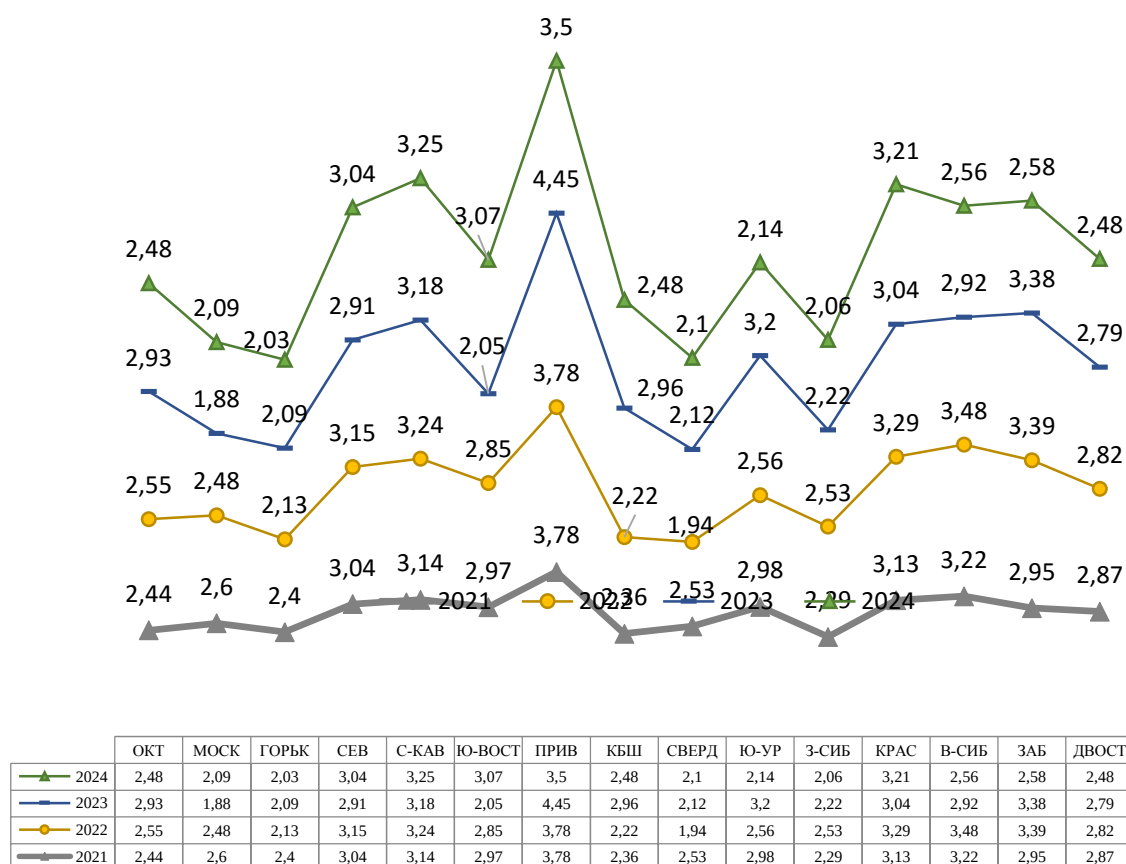


Рис. 3. Средняя продолжительность технологических «окон» за период 2021–2024 гг.

Для всесторонней оценки эффективности РШП была применена методика картирования производственных операций [10] на различных участках с привлечением экспертной группы, включавшей представителей эксплуатационных бригад, сервисных организаций, контролеров качества и разработчиков техники. Было обследовано три поезда. Выбранные участки пути для картирования представлены в табл. 4.

В процессе картирования выполнялись:

- 1) осмотр и изучение технических характеристик, конструктивных особенностей и порядка эксплуатации;
- 2) интервьюирование бригад для формирования реестра проблем;
- 3) хронометраж операций и оценка потерь;
- 4) анализ численного состава и загрузки бригады.

Всего была выявлена 41 проблема: 16 конструкционных, 23 системных и 2 технологиче-

ских. Анализ хронометража показал, что фактическая длительность шлифования составляет 40–70 мин при нормативной 115 мин (рис. 4). При этом вспомогательные операции занимают 68–78 % рабочего времени, а фактическая загрузка бригады не превышает 32–42 % (рис. 5). Основные потери времени представлены в табл. 5.

Результаты исследования и их обсуждение

Для количественной оценки надежности процесса шлифования был проведен FMEA-анализ с привлечением 11 экспертов [11]. Идентифицировано 27 потенциальных рисков нарушения пяти ключевых операций:

- 1) планирование нормативных «окон»;
- 2) организационно-техническая подготовка к «окнам»;
- 3) подготовка поезда на станции примыкания;
- 4) основные работы по шлифовке;
- 5) приемка работ представителем ОАО «РЖД».

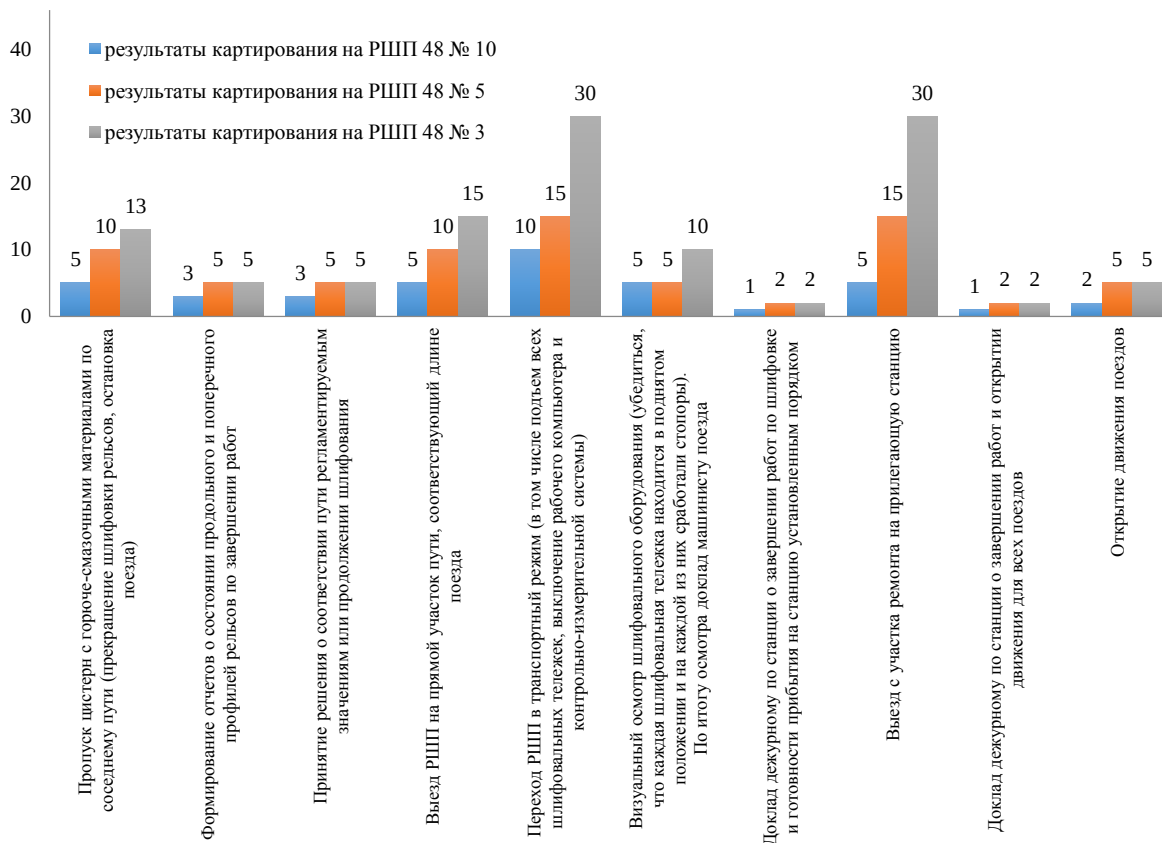
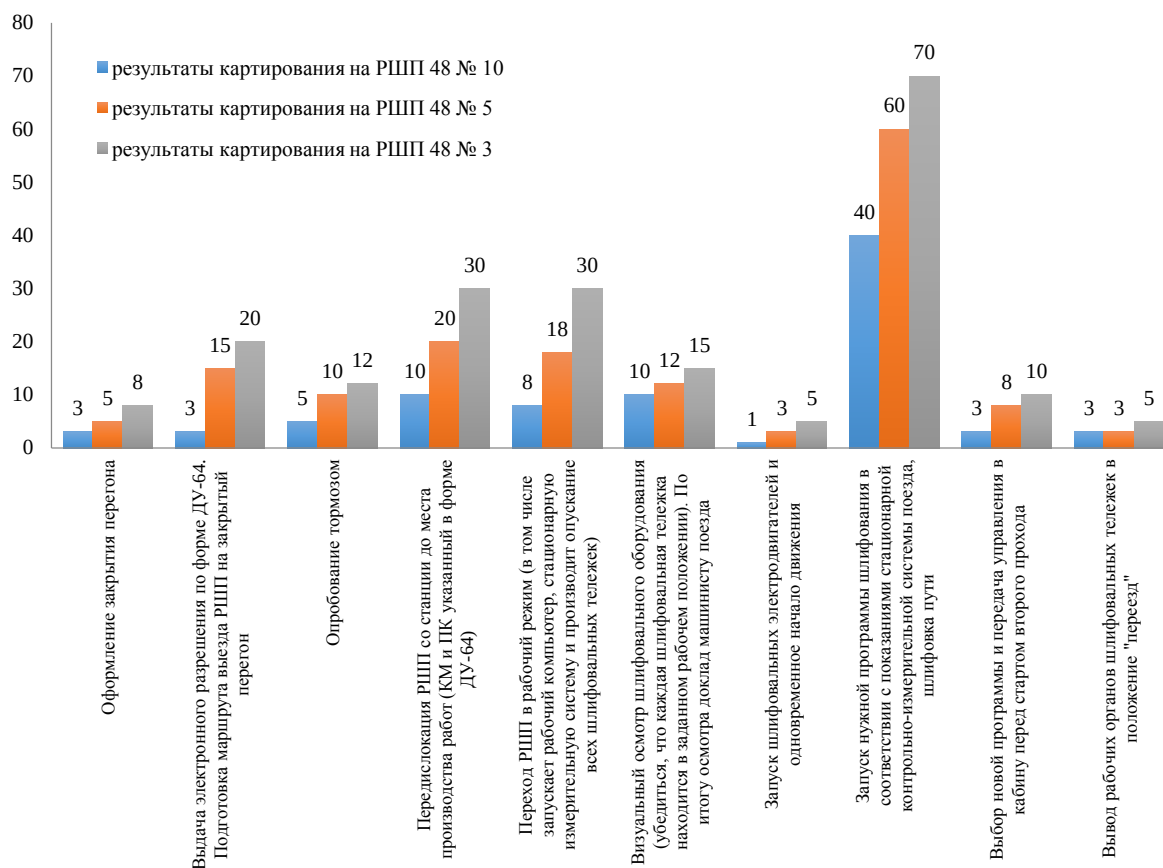


Рис. 4. Время выполнения операций, мин

Таблица 4

Выбранные участки пути для картирования

Наименование участка	Месяц	Дневная температура, °С	Ночная температура, °С	Класс пути	Протяженность участков пути, км	Грузонапряженность участка пути, млн т бр. / км в год	Пропущенный тоннаж на момент картирования млн т бр.
1. Тарханы – Елховка Приволжской железной дороги	Январь	–11,2	–14,5	I	18	74,4	284,5
2. Касторная-Новая – Горшечное Юго-Восточной железной дороги	Май	+12,0	+6,0	II	31	39	80,7
3. Канальная – Тингута Приволжской железной дороги	Август	+31,0	+22,2	I	14	31,5	215,3

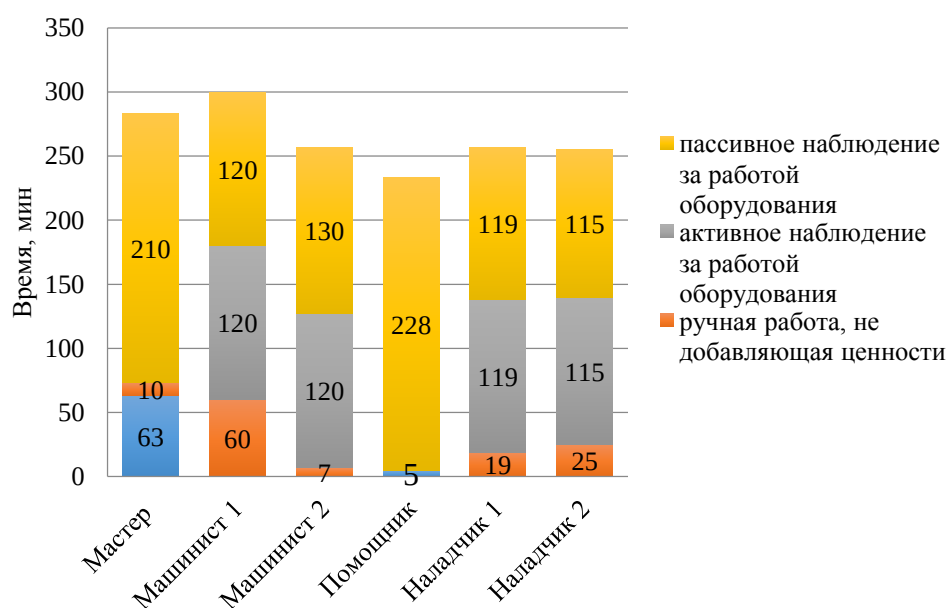


Рис. 5. Загрузка персонала

Таблица 5

Основные потери времени, выявленные при картировании

Описание	Потери, мин
1. Длительное ожидание разрешения и приказа на отправку РШП со станции базирования, мин	55–110
2. Передислокация РШП от станции базирования до станции, прилегающей к месту работ, мин	30–58
3. Длительность процесса шлифования, мин	40–70
4. Длительность вспомогательных операций в «окно», %:	
РШП № 10	68
РШП № 5	73
РШП № 3	78

Риски были ранжированы по приоритетному числу риска (ПЧР). Наибольшую угрозу представляют риски с максимальным ПЧР (табл. 6). Построенная матрица рисков (табл. 7) классифицировала 16 рисков как критические, 45 %

связаны с этапом планирования «окон» (табл. 8). Последствиями их реализации являются срывы графика движения и нарушение «оконной» дисциплины.

Таблица 6

Значимые риски с самым высоким ПЧР

Процесс	Вид потенциального риска	ПЧР
1. Планирование нормативных технологических «окон»	Запланированное время и дата технологического «окна» не соответствуют погодным условиям (в период низких и высоких температур, не соответствующих температурному диапазону работы РШП)	90
2. Организационно-технические мероприятия по подготовке к «окнам»	Планируемый участок для производства работ по шлифованию рельсов не подготовлен, материалы «покилометрового запаса» находятся в зоне рабочих органов РШП, системы и приборы безопасности, находящиеся внутри железнодорожного пути, не демонтированы	100
3. Подготовка рельсо-шлифовального поезда к производству работ на станции примыкания к участку ремонта	РШП, планируемому для производства работ, не проведены плановые виды ремонта и обслуживания узлов в соответствии с руководством по эксплуатации и проверки приборов систем безопасности	90
4. Производство основных работ по шлифованию рельсов	Руководитель работ не имеет профессиональных навыков организации работ РШП и проверки качества выполняемых работ по шлифованию рельсов	120
	При производстве работ выявлены неисправности в системе управления шлифованием при движении поезда и/или в рабочем оборудовании, предназначенном для шлифовки рельсов	200
	Персонал, эксплуатирующий РШП, не имеет профессиональных навыков производства работ по шлифованию рельсов или профессиональных навыков использования измерительного инструмента для проверки качества выполняемых работ	80
	Во время производства работ произошла остановка работ по шлифованию рельсов ввиду возгорания сухой травы и/или деревянных шпал, уложенных в пути	90

Таблица 7

Матрица рисков

Описание риска	Оценка риска
1. Фактически запланированный участок не требует работ по шлифованию рельсов	Высокий
2. Запланированный объем шлифования не соответствует планируемому времени технологического «окна»	
3. Запланированное время и дата технологического «окна» не соответствуют погодным условиям	Критический
4. Запланированное время и дата технологического «окна» совпадают с плановыми видами ремонта согласно руководству эксплуатации РШП	Умеренный
5. Запланированный участок для производства работ по шлифованию рельсов совпадает с участком иных работ по обслуживанию и капитальному ремонту пути	
6. Неверное планирование персонала смежных служб ОАО «РЖД» при назначении времени и даты технологического «окна» по шлифованию рельсов	
7. Планируемый участок для производства работ по шлифованию рельсов не подготовлен	Критический
8. Планируемый участок для производства работ по шлифованию рельсов имеет нормативные значения, не соответствующие техническим характеристикам РШП (уклон пути более 40 ‰, радиус криволинейных участков менее 250 м)	Низкий
9. Планируемый участок для производства работ по шлифованию рельсов имеет ненормативные значения, которые нарушают безопасность движения поездов	
10. РШП, планируемый для производства работ, имеет неисправность, не позволяющую выполнять работы	Критический
11. РШП, планируемый для производства работ, не обеспечен расходными материалами (абразивным инструментом, топливом) в необходимом объеме	Умеренный
12. РШП, планируемый для производства работ, не обеспечен требуемым количеством персонала по профессиям	Критический
13. РШП, планируемый для производства работ, не обеспечен достаточным количеством измерительных инструментов	
14. РШП, планируемому для производства работ, не проведены плановые виды ремонта и обслуживания узлов в соответствии с руководством по эксплуатации и проверки приборов систем безопасности	

Описание риска	Оценка риска
15. РШП, планируемый для производства работ, не обеспечен радиосвязью и/или каналы работы радиосвязи не соответствуют каналам работы станционных работников и работников, обеспечивающих безопасность проведения и организации работ	Критический
16. Руководителем, организующим работы по шлифованию рельсов РШП, изменен участок производства работ и/или объем выполняемых работ как в большую, так и меньшую сторону	Высокий
17. Руководитель работ не имеет профессиональных навыков организации работ РШП и проверки качества выполняемых работ	Критический
18. При производстве работ выявлены неисправности в системе управления шлифованием при движении поезда и/или в рабочем оборудовании	
19. Персонал, эксплуатирующий РШП, не имеет профессиональных навыков производства работ по шлифованию рельсов или профессиональных навыков использования измерительного инструмента для проверки качества выполняемых работ	
20. Во время производства работ произошла остановка работ по шлифованию рельсов ввиду возгорания сухой травы и/или деревянных шпал, уложенных в пути	Низкий
21. Во время производства работ произошла остановка работ по шлифованию рельсов ввиду наличия на участке производства работ	
22. При выполнении работ по шлифованию рельсов на двухпутном и/или многопутном участке железнодорожного пути произошла остановка работ РШП по причине производства работ на соседнем пути, ввиду нахождения персонала и техники в опасной зоне	Критический
23. При выполнении работ по шлифованию рельсов РШП нарушена работа действующих устройств, обеспечивающих работу железнодорожного пути и инфраструктуры	
24. В результате выполнения работ по шлифованию рельсов выявлены скрытые дефекты рельсов, не позволяющие качественно оценить выполненную работу	
25. Персонал, ответственный за приемку работ по шлифованию рельсов, не может оценить выполненные работы по причине отсутствия профессиональных навыков и/или измерительного инструмента	
26. Работы по шлифованию рельсов РШП не приняты ввиду несоответствия планируемого участка работ фактически выполненному	Высокий
27. Работы по шлифованию рельсов РШП приняты не в полном объеме ввиду увеличенного количества проходов в сравнении с установленными показателями о количестве проходов в зависимости от участков пути в соответствии с действующими нормативными документами	

Таблица 8

Матрицы рисков возможных отклонений

Технологическая операция	Риск
1. Планирование нормативных технологических «окон»	12
2. Организационно-технические мероприятия по подготовке к «окнам»	3
3. Подготовка рельсошлифовального поезда к производству работ на станции примыкания к участку ремонта	8
4. Производство основных работ по шлифованию рельсов	3
5. Оценка и принятие представителями ОАО «РЖД» выполненных работ по шлифованию рельсов	1
<i>Итого</i>	27

Ключевые выводы FMEA-анализа:

1. Максимальное значение ПЧР (200) выявлено для процесса основных работ, что свидетельствует о его минимальной надежности.

2. Наибольшее количество рисков связано с планированием работ и организацией «окон».

3. На параметры качества шлифования наибольшее влияние оказывает непосредственно процесс производства работ.

На основе оперограмм процесса шлифования рельсов (рис. 6) была разработана блок-схема сетевой модели шлифования (рис. 7) и проведен машинный эксперимент, состоящий из 1 000 повторений.

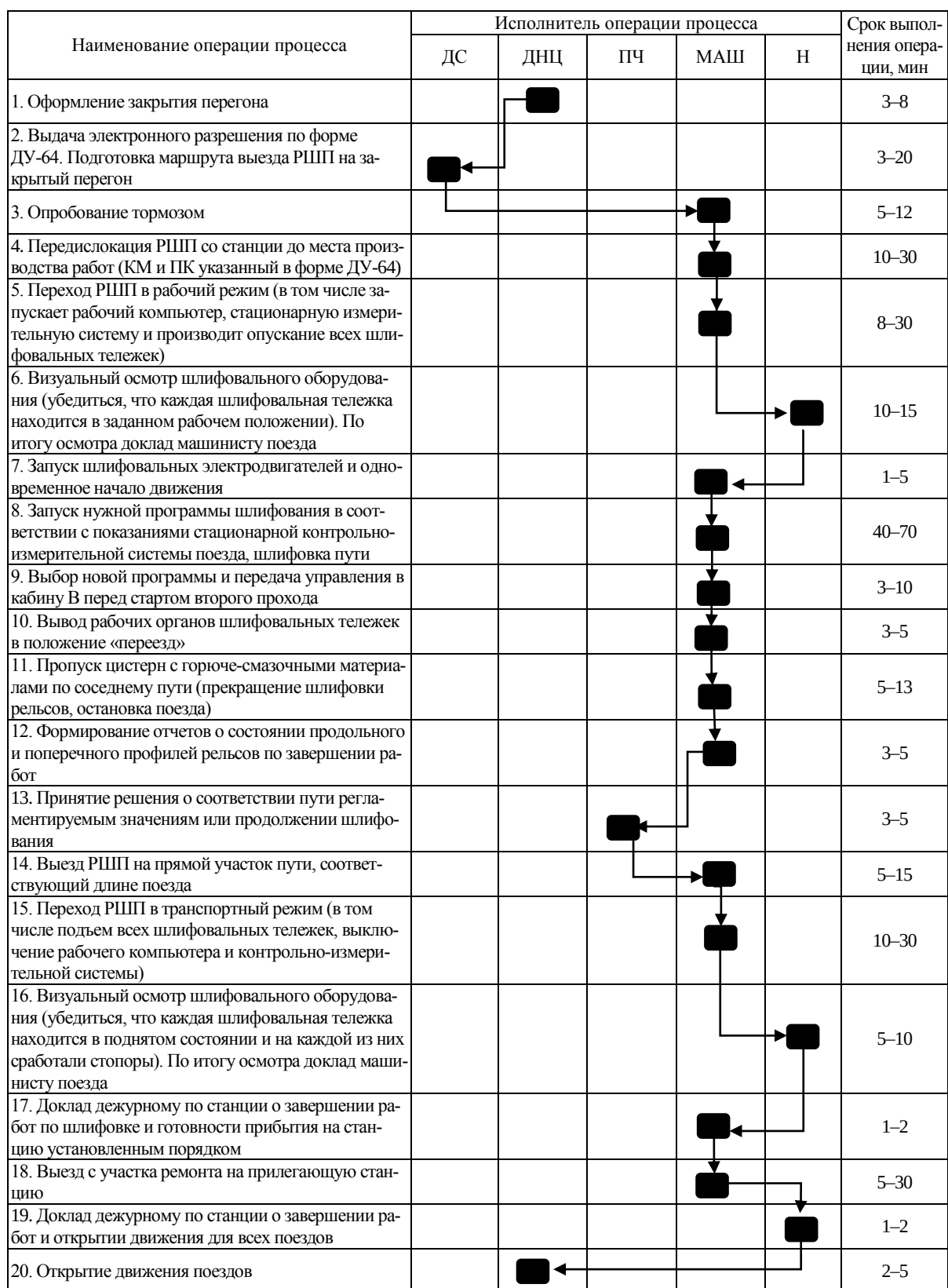


Рис. 6. Оперограмма

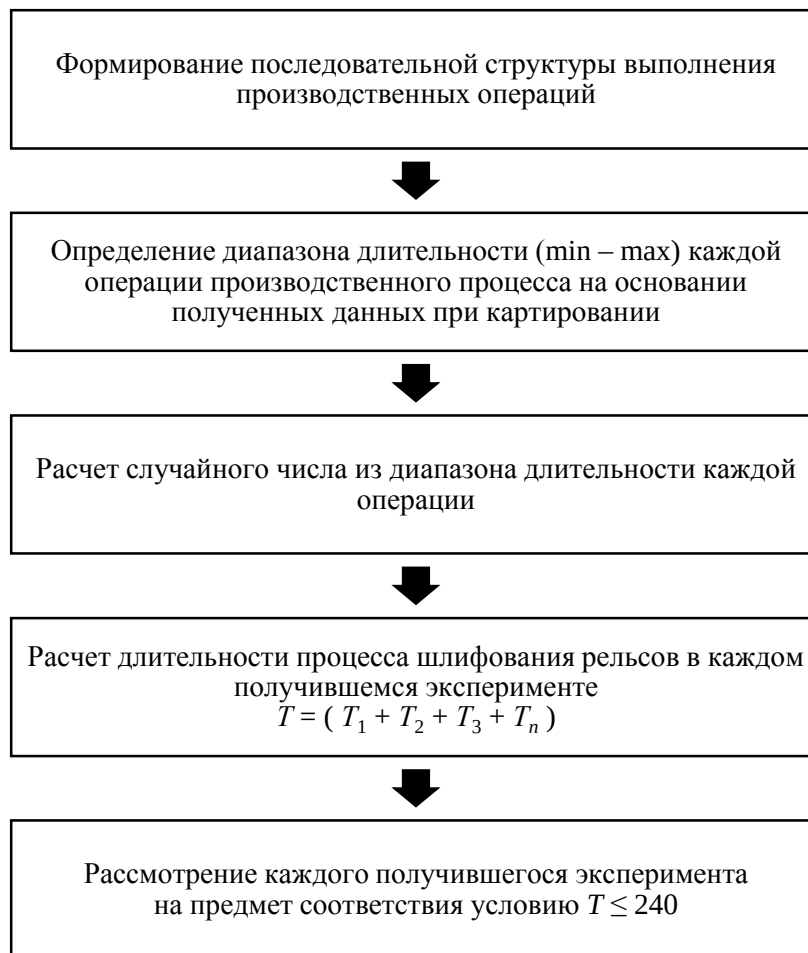


Рис. 7. Блок-схема:

T – общее время длительности процесса шлифования рельсов, мин;
 T_1, T_2, T_3, T_n – продолжительность выполнения отдельных операций

Имитационное моделирование показало, что в 19 % случаев существует риск нарушения «оконной» дисциплины. Основными причинами являются:

- 1) недостаточная квалификация бригад и контролирующего персонала;
- 2) отказы систем и оборудования поезда;
- 3) неподготовленность фронта работ.

Выводы

Проведенное комплексное исследование организационно-технологической надежности процесса шлифования рельсов выявило наличие системных проблем, существенно снижающих его эффективность и качество. На основании его результатов можно сделать следующие выводы:

1. Выявлено несоответствие между предъявляемыми к процессу шлифования рельсов требованиями и реальными возможностями. С одной стороны, нормативная потребность в шлифовке составляет не менее 198 тыс. км в

год, а с другой – фактический объем работ за последние годы не превышал 56 тыс. км, что создает угрозу для безопасности и долговечности железнодорожного пути. Усугубляет ситуацию устойчивая тенденция к сокращению продолжительности технологических «окон» (в среднем до 2,75 ч при оптимальных 6 ч), что на 45,8 % уменьшает время на выполнение работ и напрямую негативно сказывается на их качестве.

2. Выявлена низкая операционная эффективность использования рельсошлифовальных поездов. Установлено, что до 78 % рабочего времени занимают вспомогательные и непроизводительные операции, а фактические потери времени на этапах логистики и подготовки составляют от 30 до 110 мин. Фактическая загрузка бригад не превышает 42 %, что указывает на значительные резервы для оптимизации.

3. Установлено, что из 27 идентифицированных потенциальных отклонений производствен-

ного процесса шлифования рельсов 16 были классифицированы как критические. Наибольшую угрозу (максимальное приоритетное число риска 200) представляет отказ оборудования непосредственно во время работ. При этом 45 % всех рисков связаны с этапом планирования технологических «окон», что указывает на него как на ключевую болевую точку всего процесса.

4. Результаты имитационного моделирования подтвердили высокую вероятность (19 %) срыва «оконной» дисциплины и нарушения безопасности движения.

Таким образом, организационно-технологическая надежность процесса шлифования рельсов в его текущем состоянии оценивается как низкая. Основными дестабилизирующими факторами являются: несовершенство системы планирования, высокая зависимость от человеческого фактора и недостаточный уровень автоматизации и контроля.

Для кардинального улучшения ситуации необходим пересмотр организационно-технологических решений с акцентом на следующем:

- 1) цифровизация и оптимизация планирования «окон» с учетом всех рисков и ограничений;
- 2) разработка детальных регламентов и критериев выбора программ шлифования для минимизации влияния человеческого фактора;
- 3) повышение квалификации и внедрение систем поддержки принятия решений;
- 4) техническое перевооружение парка РШП и внедрение систем мониторинга их состояния в реальном времени.

Реализация этих мер позволит повысить надежность, качество и эффективность процесса шлифования рельсов, что является критически важным условием для обеспечения растущей пропускной способности и безопасности движения на сети железных дорог.

Список источников

1. Экспериментальные исследования режимов скоростного шлифования рельсов / А. С. Ильиных, А. С. Пикалов, В. К. Милорадович, М. С. Галай // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2023. Т. 25, № 3. С. 19–35. DOI 10.17212/1994-6309-2023-25.3-19-35.
2. Ильиных А. С., Милорадович В. К., Галай М. С. Исследования влияния компонентов абразивного инструмента на его эксплуатационные свойства при скоростном шлифовании рельсов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2023. № 3. С. 28–37. DOI 10.17213/1560-36-44-2023-3-28-37.
3. Абдурашитов А. Ю., Сухов В. В. Влияние использования рельсошлифовальных поездов на продление жизненного цикла рельса // Путь и путевое хозяйство. 2023. № 8. С. 20–22.
4. Костин А. Н. Опыт обслуживания рельсов в пути // Путь и путевое хозяйство. 2022. № 5. С. 35–38.
5. Предупредительное и корректирующее шлифование рельсов // Железные дороги мира. 2022. № 5. С. 58–60.
6. Сорокин А. В., Клементьев К. В. Ликвидация дефектов рельсов 46.3-4 и 14 шлифованием // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 5. С. 24–26.
7. Хвостик М. Ю., Хромов И. В. Сферы рационального применения шлифования и фрезерования рельсов в пути // Путь и путевое хозяйство. 2024. № 10. С. 19–22.
8. Технические указания по шлифованию рельсов, утвержденные распоряжением ОАО «РЖД» от 22 февраля 2011 г. № 388р. Москва, 2011. 36 с.
9. Повышение производительности рельсошлифовальных поездов методом скоростного шлифования / А. С. Ильиных, А. С. Пикалов, М. С. Галай, В. К. Милорадович // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2022. № 3 (216). С. 46–56. DOI 10.17213/15603644202244656.
10. Ротер Майкл, Шук Джон. Учись видеть бизнес-процессы : Построение карт потоков создания ценности. Москва, 2015. 203 с.
11. ГОСТ Р 27.303–2021. Надежность в технике. Анализ видов и последствий отказов : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 21 сентября 2021 г. № 987-ст. Москва : Росстандарт, 2022. 86 с.

References

1. Ilinykh A. S., Pikalov A. S., Miloradovich V. K., Galay M. S. Experimental studies of high-speed rail grinding modes. *Metal Processing (Technology, Equipment, Tools)*. 2023;25(3):19–35. (In Russ.). DOI 10.17212/1994-6309-2023-25.3-19-35.
2. Ilinykh A. S., Miloradovich V. K., Galay M. S. Study of the influence of abrasive tool components on its performance properties during high-speed rail grinding. *Proceedings of Higher Educational Institutions. North Caucasian Region. Technical Sciences*. 2023;(3):28–37. (In Russ.). DOI 10.17213/1560-36-44-2023-3-28-37.
3. Abdurashitov A. Yu., Sukhov V. V. The impact of using rail grinding trains on extending the rail life cycle. *Track and Track Facilities*. 2023;(8):20–22. (In Russ.).
4. Kostin A. N. Experience in rail maintenance along the track. *Track and Track Facilities*. 2022;(5):35–38. (In Russ.).
5. Preventive and corrective grinding of rails. *World Railways*. 2022;(5):58–60. (In Russ.).
6. Sorokin A. V., Klementyev K. V. Elimination of defects in rails 46.3-4 and 14 by grinding. *Track and Track Facilities*. 2021;(5):24–26. (In Russ.).
7. Khvostik M. Yu., Khromov I. V. Areas of rational application of grinding and milling of rails on the way. *Track and Track Facilities*. 2024;(10):19–22. (In Russ.).
8. Technical guidelines for rail grinding. Approved by order of Russian Railways 22.02.2011, No. 388r. Moscow; 2011. 36 p. (In Russ.).
9. Ilinykh A. S., Pikalov A. S., Galay M. S., Miloradovich V. K. Improving the productivity of rail-grinding trains using high-speed grinding. *Proceedings of Higher Education Institutions. North Caucasus Region. Engineering Sciences*. 2022;(216):46–56. (In Russ.). DOI 10.17213/15603644202244656.
10. Rother Michael, Shook John. Learn to see business processes. Building value stream maps. Moscow; 2015. 203 p. (In Russ.).
11. GOST R 27.303–2021. Reliability in engineering. Analysis of failure types and consequences. Moscow; 2022. 86 p. (In Russ.).

Информация об авторах

В. К. Милорадович – аспирант кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» Сибирского государственного университета путей сообщения.
А. С. Ильиных – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» Сибирского государственного университета путей сообщения.
Е. О. Юркова – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» Сибирского государственного университета путей сообщения.
В. А. Аксенов – доктор технических наук, профессор кафедры «Техносферная безопасность» Российского университета транспорта.
М. А. Култан – аспирант, преподаватель кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

V. K. Miloradovich – Postgraduate of the Transport Engineering Technology and Machine Operation Department, Siberian Transport University.
A. S. Ilinykh – Doctor of Engineering, Professor of the Transport Engineering Technology and Machine Operation Department, Siberian Transport University.
E. O. Yurkova – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Transport Engineering Technology and Machine Operation Department, Siberian Transport University.
V. A. Aksenov – Doctor of Engineering, Professor of the Technosphere Safety Department, Russian University of Transport
M. A. Kultan – Postgraduate, Lecturer of the Transport Engineering Technology and Machine Operation Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 29.09.2025; одобрена после рецензирования 13.11.2025; принята к публикации 17.11.2025.

The article was submitted 29.09.2025; approved after reviewing 13.11.2025; accepted for publication 17.11.2025.

Научная статья
УДК 656.212.5
doi:10.52170/1815-9265_2025_77_72

Методика расчета вероятности возникновения сверхнормативных нагрузок на узлы вагонов при прохождении перевальной части горки

Александр Александрович Климов^{1✉}, Дмитрий Валентинович Осипов²,
Олег Николаевич Числов³

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

³ Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия

¹ a-aklimov@yandex.ru✉

² osipovdvo@mail.ru

³ sgr@rgups.ru

Аннотация. Произведен анализ нормативных требований к конструкции продольного профиля перевальной части сортировочных горок и определены случаи, которые могут приводить к невыполнению эксплуатационных требований к данной части горки: возникновение нерасцепов в месте расцепления вагонов или саморасцепов внутри отцепов из нескольких вагонов. Установлено, что для современного вагонного парка возникновение саморасцепов возможно только для вагонов, не оборудованных ограничителями вертикальных перемещений автосцепок. При этом вследствие отклонения продольного профиля перевальной части горки от нормативных требований, в том числе из-за искажения в процессе эксплуатации, могут возникать сверхнормативные нагрузки при прохождении сцепленных вагонов горба горки при роспуске. Установлено, что основным показателем, характеризующим возможность возникновения сверхнормативных нагрузок на узлы вагонов, является величина относительного вертикального смещения центров взаимодействующих автосцепок. Сформулирована методика расчета и анализа относительного вертикального смещения центров автосцепок сцепленных вагонов при прохождении перевальной части горки. Произведено имитационное моделирование проходимости сцепленными вагонами перевальной части горки для нормативной и реальной конфигурации продольного профиля (на примере одной из действующих сортировочных горок). Сформирована методика расчета вероятности возникновения сверхнормативных нагрузок на узлы сцепленных вагонов при прохождении перевальной части горки на основании положений теории надежности. Установлено, что по критерию вероятности возникновения сверхнормативных нагрузок на узлы сцепленных вагонов может производиться как оценка качества функционирования, так и определение рациональной конфигурации продольного профиля перевальной части при проектировании новых или выправке существующих сортировочных горок.

Ключевые слова: перевальная часть горки, конфигурация продольного профиля, моделирование проходимости сцепленных вагонов, автосцепные устройства вагонов

Для цитирования: Климов А. А., Осипов Д. В., Числов О. Н. Методика расчета вероятности возникновения сверхнормативных нагрузок на узлы вагонов при прохождении перевальной части горки // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 5 (77). С. 72–81. DOI 10.52170/1815-9265_2025_77_72.

Original article

Methodology for calculating the probability of excessive loads on wagon nodes when passing the hump section

Aleksandr A. Klimov^{1✉}, Dmitry V. Osipov², Oleg N. Chislov³

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

³ Rostov State Transport University, Transport, Rostov-on-Don, Russia

¹ a-aklimov@yandex.ru✉

² osipovdvo@mail.ru

³ sgr@rgups.ru

Abstract. The analysis of regulatory requirements for the longitudinal profile of the transitional part of the gravity humps design was carried out and cases were identified that may lead to non-compliance with the operational requirements for this part of the hump – the occurrence of non-detachment at the point of detachment of cars or

self-detachment within detachments of several cars. It has been established that for the modern car park, the occurrence of self-detachment is possible only for cars that are not equipped with vertical movement limiters of automatic couplings. At the same time, due to the deviation of the longitudinal profile of the hill overpass part from the regulatory requirements, including distortion during operation, excessive loads may occur when coupled wagons pass the hump of the hill during descent. It has been established that the main indicator characterizing the possibility of excessive loads on the wagon nodes is the value of the relative vertical displacement of the interacting automatic coupling centers. A method has been formulated for calculating and analyzing the relative vertical displacement of the coupled wagons automatic coupling centers when passing the hump section. A simulation model has been developed to simulate the passing of coupled wagons through the transition part of the hump for both the standard and actual longitudinal profile configurations (using the example of one of the existing gravity humps). A method has been developed to calculate the probability of exceeding the normal loads on the joints of coupled wagons when passing through the transition part of the hump based on the principles of reliability theory. It has been established that the probability of excessive loads on the joints of coupled wagons can be used to assess the quality of operation and determine the optimal configuration of the longitudinal profile of the passing section when designing new or correcting existing gravity humps.

Keywords: the pass part of gravity hump, configuration of the longitudinal profile, simulation of the cross-country ability of coupled wagons, automatic coupling devices of wagons

For citation: Klimov A. A., Osipov D. V., Chislov O. N Methodology for calculating the probability of excessive loads on wagon nodes when passing the hump section. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(77):72–81. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_77_72.

Введение

Перевальная часть сортировочной горки рассматривается в границах вертикальных кривых, расположенных со стороны надвижной и спускной частей. Отклонение конструктивных параметров продольного профиля перевальной части от нормативных значений может приводить к существенному снижению как производительности горки, так и уровня безопасности процесса роспуска в целом [1, 2].

Конфигурация продольного профиля перевальной части горки должна обеспечивать гарантированное разъединение вагонов в месте расцепки горочным составителем. При этом должны исключаться случаи нерасцепа и «утягивания» вагонов идущим впереди отцепом, а также случаи самопроизвольного расцепления вагонов внутри многовагонных отцепов. Причина возникновения указанных случаев заключается в несоответствии конструктивных параметров продольного профиля перевальной части горки нормативным требованиям, в том числе возникающих вследствие искажения конфигурации горба горки в процессе эксплуатации [3, 4].

Необходимо отметить, что случаи саморасцепа вагонов в настоящее время практически не встречаются в реальных условиях эксплуатации вследствие оборудования вагонов современного парка ограничителями вертикальных перемещений автосцепок. Однако в случаях отклонения продольного профиля перевальной части горки от нормативных значений вместо саморасцепления вагонов возникает дополнительное силовое воздействие на конструктивные узлы вагонов (в частности, на

корпус автосцепки, тяговый хомут, маятниковую подвеску, центрирующую балочку и др.). При этом указанное дополнительное воздействие возникает в местах сцепления вагонов внутри многовагонного отцепа, что может приводить к накоплению усталостных нагрузок, приводящих к постепенному износу и разрушению конструктивных узлов вагонов, в результате чего могут иметь место случаи нарушения условий безопасности движения подвижного состава уже в пути следования, в том числе с тяжелыми последствиями.

В связи с этим возникает необходимость разработки методики оценки конструкции продольного профиля горба горки по критерию вероятности возникновения дополнительных, сверхнормативных нагрузок на узлы вагонов при прохождении перевальной части.

Согласно действующим нормативам конструктивные параметры продольного профиля перевальной части горки могут проектироваться по двум основным вариантам: с наличием разделительной площадки со стороны надвижной части и без нее [5]. При этом установлены диапазоны допустимых значений уклонов элементов продольного профиля, а также радиусов вертикальных кривых со стороны как надвижной, так и спускной части горки. В результате задача определения рациональной конфигурации продольного профиля перевальной части является многовариантной и должна решаться с учетом специфики технического оснащения, структуры перерабатываемого вагоно- и отцепопотока, а также метеорологических условий местности расположения станции.

Результаты исследований, приведенные в работе [6], показывают, что с целью повышения эффективности роспуска целесообразно применять наиболее крутые значения уклонов со стороны надвижной и спускной части горки и использовать минимальные значения радиусов кривой со стороны спускной части. Это обеспечит повышение перерабатывающей способности горки, но приведет к увеличению вероятности возникновения сверхнормативных нагрузок на узлы сцепленных вагонов при прохождении перевальной части, в том числе из-за возможных отклонений параметров продольного профиля в процессе эксплуатации.

В работе [7] показано влияние радиусов вертикальных кривых перевальной части горки на координату точки отрыва отцепы от состава и технологический процесс роспуска. Установлено, что превышение нормативных значений радиусов вертикальных кривых приводит к увеличению числа случаев остановки роспуска и повторного надвига состава.

Так как на сортировочных горках перерабатывается различный подвижной состав, конструкция продольного профиля перевальной части должна обеспечивать проходимость горба сцепами из разных типов вагонов. В последнее время значительно увеличилось число перерабатываемых длиннобазных вагонов, в первую очередь за счет увеличения парка фитинговых и

других специализированных платформ, а также парка крытых вагонов для перевозки легковесных грузов и автомобилей. Кроме этого, появляются новые 6-осные вагоны сочлененного типа, исследование проходимости через горб горки такого подвижного состава приведено в работе [8]. Приведенные тренды показывают, что для определения рациональной конфигурации продольного профиля перевальной части в рамках диапазонов допустимых значений должны использоваться специализированные критерии, отражающие характер работы данной части горки, что частично реализовано в настоящей статье.

Основным показателем, характеризующим проходимость сцепленных вагонов по участкам перелома продольного профиля пути, является относительное вертикальное смещение центров взаимодействующих автосцепок $\Delta h_{\text{геом}}$ [9, 10]. Превышение допустимой разницы высот продольных осей сцепленных автосцепок возникает при их больших относительных перемещениях в вертикальной плоскости, что и происходит при прохождении горба горки, конфигурация которого обеспечивает изменение разности высот продольных осей автосцепок сначала в одном направлении относительно нулевого уровня ($\Delta h_{\text{геом}}^{(+)}$), а затем в другом ($\Delta h_{\text{геом}}^{(-)}$), рис. 1.

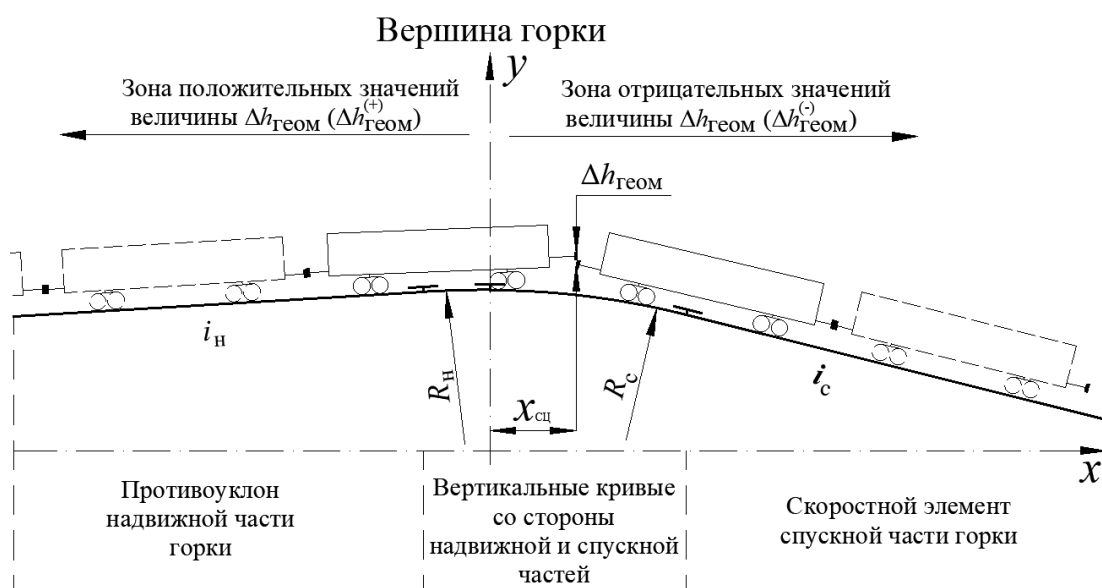


Рис. 1. Расчетная схема прохождения сцепленными вагонами горба горки:

R_n , R_c – радиусы вертикальной кривой со стороны надвижной и спускной частей соответственно, м;
 i_n – крутизна противоклона, ‰; i_c – уклон первого скоростного элемента, ‰; $\Delta h_{\text{геом}}$ – относительное вертикальное смещение осей автосцепок смежных вагонов, м; $x_{\text{сц}}$ – общая координата сцепы, соответствующая удалению центра сцепленных автосцепок от начала координат, м

Зависимость $\Delta h_{\text{геом}}$ от $x_{\text{сц}}$ имеет две экстремальные точки $\Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}$ и $\Delta h_{\text{геом}}^{\min(-)}$ с разными знаками (рис. 2). В работах [9, 10] установлено, что этими максимальными значениями $\Delta h_{\text{геом}}$ и определяется проходимость отцепа по горбу горки без саморасцепа или возникновения сверхнормативных воздействий на автосцепное устройство. При этом возникновение этих негативных явлений – вероятностное событие, зависящее от величин $\Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}$ и $\Delta h_{\text{геом}}^{\min(-)}$ [10, 11].

Согласно рис. 2, б для реальной горки экстремумы величины $\Delta h_{\text{геом}}$ выходят за пределы допустимого диапазона, т. е. появляется вероятность возникновения дополнительных сверхнормативных нагрузок на узлы вагонов. В этом случае изменение параметра $\Delta h_{\text{геом}}$ характеризуется отклонением от плавной зависимости, с наличием локальных скачков графика функции, что обусловлено отклонением конструктивных параметров исследуемого горба горки от нормативных значений, в том числе вследствие искажения продольного профиля в процессе эксплуатации.

Исследование конструкции перевальной части горки по критерию возникновения сверхнормативных нагрузок целесообразно производить на основании последовательного решения следующих задач:

1) определение максимальных значений относительных вертикальных смещений осей автосцепок сцепленных вагонов при прохождении перевальной части горки;

2) расчет вероятности возникновения сверхнормативных нагрузок на узлы вагонов при прохождении горба горки.

Материалы и методы исследования

Методика решения первой задачи

Относительное вертикальное смещение осей автосцепок $\Delta h_{\text{геом}}$ определяется как разность ординат центров зацепления смежных автосцепок (сцепленных вагонов 1 и 2 соответственно), мм:

$$\Delta h_{\text{геом}} = y_a^1 - y_a^2. \quad (1)$$

В расчете принимается, что при расположении сцепленных вагонов на горизонтальном участке пути разница высот продольных осей автосцепок была бы равна нулю. При таком подходе параметр $\Delta h_{\text{геом}}$ характеризует только дополнительное вертикальное смещение осей автосцепок, вызванное проходом сцепленных вагонов через разные элементы продольного профиля перевальной части.

Расчет параметра $\Delta h_{\text{геом}}$ целесообразно производить на основании имитационного моделирования прохождения сцепленных ваго-

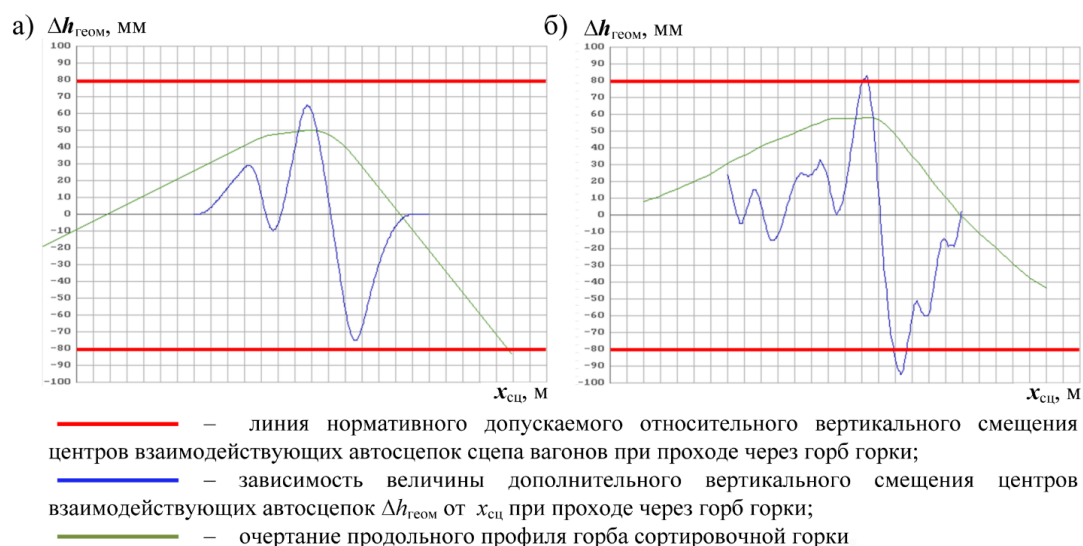


Рис. 2. Изменение величины относительного вертикального смещения осей автосцепок $\Delta h_{\text{геом}}$ при прохождении универсальных платформ по перевальной части горки:

а – имеющей проектное очертание с профильным разделительным элементом (длиной 10 м и крутизной 5 ‰) и нормативными параметрами ($R_c = 250$ м, $R_n = 350$ м, $i_n = 20$ ‰, $i_c = 50$ ‰);

б – имеющей аналогичное проектное очертание реальной эксплуатируемой горки с учетом искажений продольного профиля

нов через горб горки, например с использованием программы «Горб горки – проверка профиля», разработанной авторами статьи [12]. При моделировании имитируется продвижение вагонов по перевальной части горки с шагом Δx и расчетом параметра $\Delta h_{\text{геом}}$ для каждого нового положения сцепленных вагонов. Результатом моделирования является расчет экстремумов $\Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}(+)}$ и $\Delta h_{\text{геом}}^{\text{min}(-)}$ и сравнение их с допустимыми значениями.

Методика решения второй задачи

Сверхнормативные нагрузки на узлы вагонов при проходе сцепленных вагонов через горб горки возникают в случае наличия в их автосцепках ограничителей вертикальных перемещений. В настоящее время автосцепки всего парка вагонов оборудованы хотя бы одним нижним ограничителем вертикальных перемещений. У некоторых вагонов, например цистерн, для увеличения надежности зацепления автосцепки оборудованы двумя ограничителями вертикальных перемещений – верхним и нижним.

При достижении значения вертикального смещения осей автосцепок 140 мм происходит их заклинивание ограничителями вертикальных перемещений, что вызывает подъем головы одной из автосцепок. При этом возможен подъем головы на величину, ограниченную вертикальными размерами окна розетки, допускающими отклонение корпуса автосцепки на 3° вверх. Дальнейший подъем уже невозможен. В результате этого хвостовик автосцепки одного из вагонов упирается через тяговый хомут в перекрытие хребтовой балки и начинает поднимать вагон, что может приводить к изгибу хвостовика или изломам маятниковых подвесок смежной автосцепки.

Наличие конструкции подпружинивающей опоры позволяет опускаться хвостовику автосцепки до 40 мм, что допускает отклонение автосцепки на 6° вниз. Этим обеспечивается погашение расчетной разности уровней осей автосцепок (с учетом неблагоприятного сочетания допусков) дополнительно на величину ≈ 70 мм.

Таким образом, вероятность сверхнормативных нагрузок на узлы вагонов, автосцепки которых оборудованы ограничителями вертикальных перемещений, будет появляться при выполнении условия

$$\Delta h > \Delta h_{\text{доп}}, \quad (2)$$

где Δh – относительное вертикальное смещение осей автосцепок смежных вагонов, мм; $\Delta h_{\text{доп}}$ – допускаемое значение смещения осей автосцепок смежных вагонов согласно нормам проектирования вагонов, мм [13–15].

Величина $\Delta h_{\text{доп}}$ зависит от конструктивных данных взаимодействующих автосцепок и их износа. Нормами установлено, что для типовых автосцепок СА-3, опирающихся на центрирующий прибор жесткого типа, величина $\Delta h_{\text{доп}}$ составляет 180 мм. Для вагонов, оборудованных усиленными автосцепками СА-3, которые опираются на центрирующий прибор с подпружиненной опорой для хвостовика, величина $\Delta h_{\text{доп}}$ равна 250 мм.

Значение величины Δh складывается из следующих величин:

- дополнительного вертикального смещения осей автосцепок $\Delta h_{\text{геом}}$, вызванного проходом вагонов по перевальной части горки;
- начального вертикального смещения продольных осей автосцепок $\Delta h_{\text{нач}}$, соответствующего фактической разности высот продольных осей автосцепок смежных вагонов при их расположении на горизонтальном пути;
- случайного вертикального смещения $\Delta h_{\text{случ}}$, обусловленного колебательными процессами при прохождении вагонов по перевальной части горки вследствие воздействия различных видов колебаний в вертикальной плоскости.

На основании статистического анализа установлено, что величина $\Delta h_{\text{нач}}$, образующаяся при формировании состава, является случайной, с усеченным нормальным законом распределения в границах от -100 до $+100$ мм (согласно ПТЭ) и математическим ожиданием, равным нулю.

Величина $\Delta h_{\text{случ}}$ зависит от множества факторов, наиболее значимым из которых является скорость движения подвижного состава. Для скоростей движения до 10 км/ч, соответствующих скоростям роспуска составов, максимальное значение величины $\Delta h_{\text{случ}}$ можно принять равным 10 мм.

Очевидно, что величина Δh является случайной, ее параметры будут определяться по формулам:

$$M[\Delta h] = M[\Delta h_{\text{геом}}] + M[\Delta h_{\text{нач}}] + M[\Delta h_{\text{случ}}], \quad (3)$$

$$\sigma[\Delta h] = \sqrt{\sigma_{\Delta h_{\text{геом}}}^2 + \sigma_{\Delta h_{\text{нач}}}^2 + \sigma_{\Delta h_{\text{случ}}}^2}, \quad (4)$$

где M – математические ожидания соответствующих величин, мм; σ – стандартные отклонения величин, мм.

Величина $\Delta h_{\text{геом}}$ принимается детерминированной, значения которой при определении сверхнормативных усилий соответствуют экстремумам $\Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}$ и $\Delta h_{\text{геом}}^{\min(-)}$. Величины $\Delta h_{\text{нач}}$ и $\Delta h_{\text{случ}}$ случайные, имеющие математическое ожидание, равное нулю. Соответственно, после преобразования формул (3) и (4) параметры величины Δh составят:

$$M[\Delta h] = \Delta h_{\text{геом}}, \quad (5)$$

$$\sigma[\Delta h] = \sqrt{\sigma_{\Delta h_{\text{нач}}}^2 + \sigma_{\Delta h_{\text{случ}}}^2}. \quad (6)$$

Определение вероятности возникновения сверхнормативных нагрузок на узлы вагонов при прохождении горба горки $P_{\text{сн}}$ производится с помощью стохастической математической модели, представленной на рис. 3, которая может быть сведена к известной в теории надежности модели типа «нагрузка – прочность». При этом под нагрузкой понимается случайная величина Δh , а под прочностью – детерминированная величина $\Delta h_{\text{доп}}$. В модели учтено, что величина $\Delta h_{\text{геом}}$ может принимать два экстремума: положительный $\Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}$ (до вершины горки) и отрицательный $\Delta h_{\text{геом}}^{\min(-)}$

(за вершиной горки). Поэтому в модели присутствует также и распределение величины $\Delta h_{\text{доп}}$ в области отрицательных значений.

Композиция плотности распределения величины Δh и величины $\Delta h_{\text{доп}}$ позволяет получить еще одну случайную величину и ее распределение H (превышение фактического вертикального смещения осей автосцепок над допускаемым вертикальным смещением):

$$H = \Delta h_{\text{доп}} - \Delta h. \quad (7)$$

Очевидно, что сверхнормативные вертикальные нагрузки на автосцепки вагонов могут иметь место при превышении величины нагрузки Δh над прочностью $\Delta h_{\text{доп}}$. Отсюда, согласно модели (см. рис. 3), вероятность появления сверхнормативных вертикальных нагрузок на узлы вагонов $P_{\text{сн}}$ при заданном дополнительном вертикальном смещении осей автосцепок $\Delta h_{\text{геом}}$ определяется по интегральной функции распределения вероятности случайной величины H :

$$P_{\text{сн}}(H \leq 0) = \int_{-\infty}^0 f(H) dH \quad (8)$$

$$\text{при } \Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)} \text{ и } \Delta h_{\text{доп}} > 0;$$

$$P_{\text{сн}}(H \geq 0) = \int_0^{\infty} f(H) dH \quad (9)$$

$$\text{при } \Delta h_{\text{геом}}^{\min(-)} \text{ и } \Delta h_{\text{доп}} < 0,$$

где $f(H)$ – плотность распределения случайной величины H .

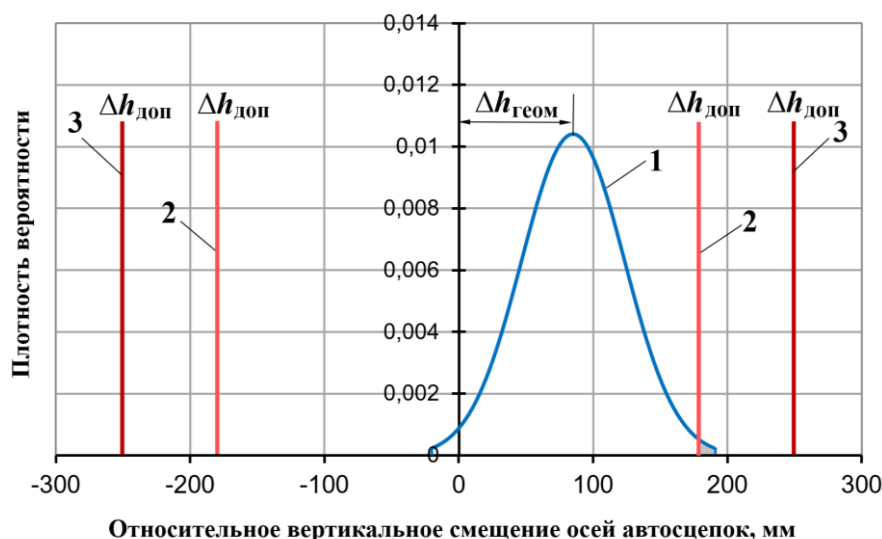


Рис. 3. Стохастическая модель для определения вероятности возникновения сверхнормативных вертикальных нагрузок на автосцепки вагонов (при прохождении сцепленными вагонами зоны положительных значений величины $\Delta h_{\text{геом}}^{(+)}$ на горбе горки):

1 – плотность распределения величины фактического относительного вертикального смещения осей автосцепок Δh ; 2, 3 – уровни допускаемого относительного вертикального смещения осей автосцепок $\Delta h_{\text{доп}}$ для типовых автосцепок СА-3, опирающихся на центрирующий прибор жесткого типа, и для усиленных автосцепок СА-3, опирающихся на центрирующий прибор с подпружиненной опорой для хвостовика соответственно

Для решения выражений (8) и (9) целесообразно использовать известную в теории надежности формулу для определения величины вероятности отказа в модели «нагрузка – прочность»:

$$P_{\text{сн}} = 0,5 - \Phi \left(\frac{M[\Delta h_{\text{доп}}] - M[\Delta h]}{\sqrt{\sigma_{\Delta h_{\text{доп}}}^2 + \sigma_{\Delta h}^2}} \right), \quad (10)$$

где $\Phi(x)$ – нормированная функция Лапласа,

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{u^2}{2}} du.$$

Соответственно, после преобразований и подстановки параметров случайной величины Δh , а также детерминированной величины $\Delta h_{\text{доп}}$ выражения (8) и (9) примут вид

$$P_{\text{сн1}}^{(+)} = \Phi \left(\frac{(\Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}(+)} + \Delta h_{\text{нач}}^{\text{max}} + \Delta h_{\text{случ}}^{\text{max}}) - \Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}(+)}}{\sqrt{\sigma_{\Delta h_{\text{нач}}}^2 + \sigma_{\Delta h_{\text{случ}}}^2}} \right) - \Phi \left(\frac{\Delta h_{\text{доп}} - \Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}(+)}}{\sqrt{\sigma_{\Delta h_{\text{нач}}}^2 + \sigma_{\Delta h_{\text{случ}}}^2}} \right); \quad (11)$$

$$P_{\text{сн2}}^{(-)} = \Phi \left(\frac{(|\Delta h_{\text{геом}}^{\text{min}(-)}| + \Delta h_{\text{нач}}^{\text{max}} + \Delta h_{\text{случ}}^{\text{max}}) - |\Delta h_{\text{геом}}^{\text{min}(-)}|}{\sqrt{\sigma_{\Delta h_{\text{нач}}}^2 + \sigma_{\Delta h_{\text{случ}}}^2}} \right) - \Phi \left(\frac{\Delta h_{\text{доп}} - |\Delta h_{\text{геом}}^{\text{min}(-)}|}{\sqrt{\sigma_{\Delta h_{\text{нач}}}^2 + \sigma_{\Delta h_{\text{случ}}}^2}} \right), \quad (12)$$

где $\Delta h_{\text{нач}}^{\text{max}}$ – максимальное начальное вертикальное смещение продольных осей автосцепок, образующееся при формировании состава, мм; $\Delta h_{\text{случ}}^{\text{max}}$ – максимальное вертикальное смещение, обусловленное случайными колебательными процессами при прохождении вагонов по перевальной части горки, принимаемое равным 10 мм.

Итоговая вероятность появления сверхнормативных вертикальных нагрузок на узлы вагонов $\Sigma P_{\text{сн}}$ при проходе перевальной части горки определяется вероятностями наступления двух событий:

- 1) появление сверхнормативных нагрузок до вершины горки $P_{\text{сн1}}^{(+)}$ при $\Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}(+)} > 0$;
- 2) появление сверхнормативных нагрузок после прохождения вершины горки $P_{\text{сн2}}^{(-)}$ при $\Delta h_{\text{геом}}^{\text{min}(-)} < 0$.

Величина $\Sigma P_{\text{сн}}$ равна сумме вероятностей этих событий без вероятности их совместного наступления и определяется по формуле

$$\begin{aligned} \Sigma P_{\text{сн}} &= P_{\text{сн1}}^{(+)} + P_{\text{сн2}}^{(-)} (1 - P_{\text{сн1}}^{(+)}) = \\ &= P_{\text{сн1}}^{(+)} + P_{\text{сн2}}^{(-)} - P_{\text{сн1}}^{(+)} P_{\text{сн2}}^{(-)} = \\ &= 1 - (1 - P_{\text{сн1}}^{(+)}) (1 - P_{\text{сн2}}^{(-)}) = 1 - \\ &- (1 - \int_{-\infty}^0 f(H_1) dH_1) (1 - \int_0^{\infty} f(H_2) dH_2), \end{aligned} \quad (13)$$

где $f(H_1)$ – плотность распределения случайной величины H_1 при величине $\Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}(+)} > 0$ и $\Delta h_{\text{доп}} > 0$; $f(H_2)$ – плотность распределения случайной величины H_2 при величине $\Delta h_{\text{геом}}^{\text{min}(-)} < 0$ и $\Delta h_{\text{доп}} < 0$.

После подстановки выражений (11) и (12) в формулу (13) и преобразования получим следующее выражение:

$$\begin{aligned} \Sigma P_{\text{сн}} &= 1 - \\ &- \left[1 - \Phi \left(\frac{(\Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}(+)} + \Delta h_{\text{нач}}^{\text{max}} + \Delta h_{\text{случ}}^{\text{max}}) - \Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}(+)}}{\sqrt{\sigma_{\Delta h_{\text{нач}}}^2 + \sigma_{\Delta h_{\text{случ}}}^2}} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \Phi \left(\frac{\Delta h_{\text{доп}} - \Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}(+)}}{\sqrt{\sigma_{\Delta h_{\text{нач}}}^2 + \sigma_{\Delta h_{\text{случ}}}^2}} \right) \right] \times \\ &\times \left[1 - \Phi \left(\frac{(|\Delta h_{\text{геом}}^{\text{min}(-)}| + \Delta h_{\text{нач}}^{\text{max}} + \Delta h_{\text{случ}}^{\text{max}}) - |\Delta h_{\text{геом}}^{\text{min}(-)}|}{\sqrt{\sigma_{\Delta h_{\text{нач}}}^2 + \sigma_{\Delta h_{\text{случ}}}^2}} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \Phi \left(\frac{\Delta h_{\text{доп}} - |\Delta h_{\text{геом}}^{\text{min}(-)}|}{\sqrt{\sigma_{\Delta h_{\text{нач}}}^2 + \sigma_{\Delta h_{\text{случ}}}^2}} \right) \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

При ограничении $\Delta h_{\text{нач}}^{\text{max}}$ значением, равным 100 мм, что соответствует требованиям ПТЭ, а также $\Delta h_{\text{случ}}^{\text{max}} = 10$ мм выражение (14) упростится и примет вид

$$\begin{aligned} \Sigma P_{\text{сн}} &= 1 - \left[0,50051 + \Phi \left(\frac{\Delta h_{\text{доп}} - \Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}(+)}}{\sqrt{\sigma_{\Delta h_{\text{нач}}}^2 + \sigma_{\Delta h_{\text{случ}}}^2}} \right) \right] \times \\ &\times \left[0,50051 + \Phi \left(\frac{\Delta h_{\text{доп}} - |\Delta h_{\text{геом}}^{\text{min}(-)}|}{\sqrt{\sigma_{\Delta h_{\text{нач}}}^2 + \sigma_{\Delta h_{\text{случ}}}^2}} \right) \right]. \end{aligned} \quad (15)$$

Рассчитанные по формулам (14) или (15) вероятности возникновения сверхнормативных нагрузок на узлы вагонов при прохождении горба горки могут использоваться для сравнения вариантов конструктивных параметров продольного профиля перевальной части горки и оценки его возможного влияния на технико-эксплуатационные показатели работы

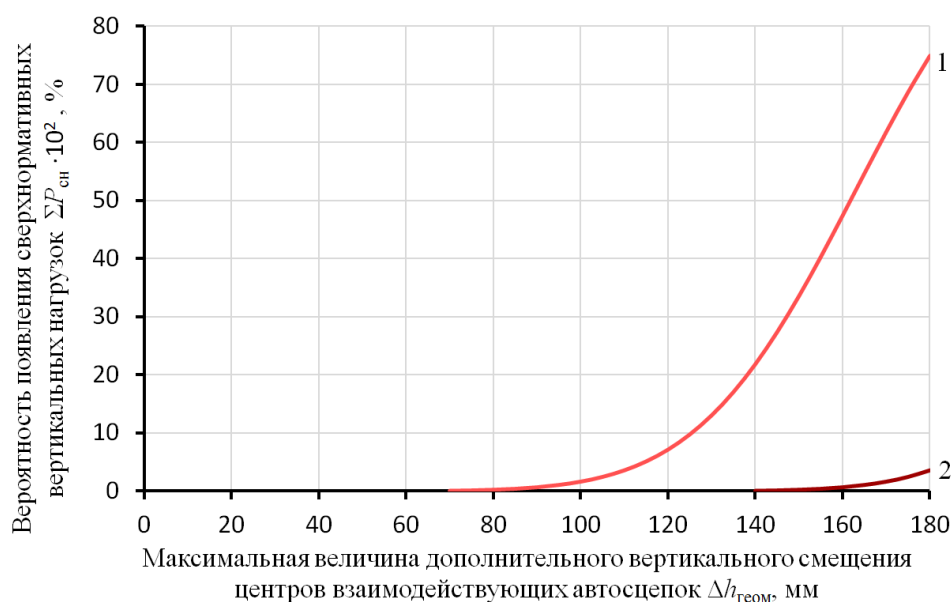


Рис. 4. Зависимость вероятности появления сверхнормативных вертикальных нагрузок на узлы вагонов при проходе перевальной части горки от значения величины $\Delta h_{\text{геом}}$:

1, 2 – вероятность появления сверхнормативных вертикальных нагрузок на узлы вагонов, оборудованных типовыми автосцепками СА-3, опирающимися на центрирующий прибор жесткого типа, и усиленными автосцепками СА-3, опирающимися на центрирующий прибор с подпружиненной опорой для хвостовика соответственно

сортировочной горки. При этом показатель $\Sigma P_{\text{сн}}$ не может использоваться для определения конкретных величин дополнительных силовых взаимодействий на узлы вагонов и расчета вероятности выхода из строя деталей автосцепного устройства.

Результаты исследования

Зависимость вероятностей появления сверхнормативных вертикальных нагрузок на узлы вагонов от дополнительного вертикального смещения осей автосцепок для стандартной автосцепки СА-3 и усиленной автосцепки СА-3, опирающейся на центрирующий прибор с подпружиненной опорой для хвостовика, представлена на рис. 4.

Из полученных зависимостей следует, что зависимость вероятности появления сверхнормативных вертикальных нагрузок на узлы вагонов от величины дополнительного вертикального смещения автосцепок близка к квадратичной. Установлено, что при $\Delta h_{\text{геом}} < 80$ мм узлы как стандартных, так и длиннобазных вагонов не подвергаются сверхнормативным вертикальным нагрузкам. Соответственно, при проходе перевальной части горки у них должно отсутствовать явление повреждения

автосцепных устройств при любых сочетаниях в многовагонных отцепках. Вероятность появления сверхнормативных вертикальных нагрузок появляется при $\Delta h_{\text{геом}}$ более 80 мм для вагонов с автосцепками типа СА-3, опирающимися на центрирующий прибор жесткого типа, и при $\Delta h_{\text{геом}}$ более 150 мм для длиннобазных вагонов с автосцепками типа СА-3, опирающимися на центрирующий прибор с подпружиненной опорой для хвостовика.

Выводы

В результате выполненного исследования сформирована методика оценки конфигурации продольного профиля перевальной части сортировочной горки по критерию возникновения сверхнормативных вертикальных нагрузок на узлы вагонов. С использованием данной методики целесообразно производить оценку конфигурации продольного профиля горба эксплуатируемых сортировочных горок и определять потребность в их выправке. Разработанный подход также рекомендуется использовать при проектировании новых сортировочных горок для сравнения конкурирующих вариантов конструкции продольного профиля перевальной части.

Список источников

1. Варламов А. В., Мазько Н. Н., Варламова Н. Х. Перспективные технические средства автоматизации и механизации сортировочных горок // Вестник транспорта Поволжья. 2022. № 3 (93). С. 40–46.
2. Иванкова Л. Н., Бондаренко И. С. Влияние основных параметров профиля надвигной и спускной частей сортировочной горки на перерабатывающую способность // Наука и техника транспорта. 2012. № 4. С. 42–46.
3. Пожидаев С. А., Филатов Е. А., Кирик Н. В. Исследование особенностей взаимодействия подвижного состава на перевальной части сортировочных горок в реальных условиях для улучшения их параметров и повышения безопасности перевозочного процесса // Проблемы безопасности на транспорте : материалы VI Международной научно-практической конференции. Гомель : БелГУТ, 2012. С. 44–45.
4. Пожидаев С. А., Дорошко С. В. Повышение эффективности и безопасности при организации сортировочной работы на станции // Тихомировские чтения: инновационные технологии перевозочного процесса : материалы Международной научно-практической конференции. Гомель : БелГУТ, 2019. С. 131–135.
5. СП 119.13330.2024. Железные дороги колеи 1520 мм : утверждены приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 1 июля 2024 г. № 432/пр. Москва, 2024. 188 с.
6. Иванкова Л. Н., Подорожкина А. В., Буракова А. В. Особенности проектирования перевальной части сортировочной горки // Наука и техника транспорта. 2022. № 2. С. 47–49.
7. Негрей В. Я., Пожидаев С. А., Филатов Е. А. Исследование динамики движения подвижного состава на перевальной части сортировочных горок для повышения безопасности и надежности технологических процессов // Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса. Гомель : БелГУТ, 2013. С. 95–97.
8. Кукушина Н. А. Разработка методики и расчет условий прохождения сочлененными платформами сортировочных горок и кривых участков пути // Транспорт Российской Федерации. 2013. № 2 (45). С. 71–75.
9. Сцепляемость и проходимость вагонов в кривых малого радиуса и по горкам / ред. Ю. А. Хапилов // Труды ВНИИЖТ. Москва : Транспорт, 1971. Вып. 440. 96 с.
10. Климов А. А., Осипов Д. В. Моделирование проходимости вагонов без саморасцепа по перевальной части сортировочной горки // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 3 (47). С. 154–160.
11. Осипов Д. В., Климов А. А. Методика оценки качества продольного профиля перевальной части сортировочной горки // Транспорт Урала. 2015. № 4 (47). С. 63–68.
12. Осипов Д. В., Климов А. А. Программа для оценки качества продольного профиля горочных путей «Горб горки – Проверка профиля» // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование». 2015. № 12 (79). С. 119.
13. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) : с изменениями и дополнениями № 1 (с 01.02.2000), № 2 (с 01.03.2002), № 3 (с 01.03.2004). Москва : ГосНИИВ : ВНИИЖТ, 1996. 318 с.
14. ГОСТ 33211–2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам : введен в действие с 1 июля 2016 г. / разработан ОАО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (ОАО «ВНИИЖТ»). Москва : Стандартинформ, 2016. 54 с.
15. ГОСТ 32700–2020. Железнодорожный подвижной состав. Методы контроля сцепляемости : введен в действие с 1 декабря 2020 г. / разработан ОАО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (ОАО «ВНИИЖТ»). Москва : Стандартинформ, 2020. 28 с.

References

1. Varlamov A. V., Mazko N. N., Varlamova N. Kh. Promising technical means of automation and mechanization of gravity humps. *Vestnik Transporta Povolzhya*. 2022;(93):40–46. (In Russ.).
2. Ivankova L. N., Bondarenko I. S. Influence of the main parameters of the profile of the advancing and descending parts of the gravity hump on the processing capacity. *Science and Technology of Transport*. 2012;(4):42–46. (In Russ.).
3. Pozhidaev S. A., Filatov E. A., Kirik N. V. Research of the rolling stock interaction features at the passage part of sorting piles in real conditions to improve their parameters and increase the safety of the transportation process. *Problems of Transport Safety. Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference*. Gomel: Belarusian State University of Transport; 2012. P. 44–45. (In Russ.).
4. Pozhidaev S. A., Doroshko S. V. Improving efficiency and safety in sorting operations at stations. *Tikhomirov readings: Innovative Technologies in the Transportation Process. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Gomel: Belarusian State University of Transport; 2019. P. 131–135. (In Russ.).

5. SP 119.13330.2024. Railways of 1520 mm gauge. Approved by order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation, 01.07.24, No. 432/ave. Moscow; 2024. 188 p. (In Russ.).
6. Ivankova L. N., Podorozhkina A. V., Burakova A. V. Features of designing the passage part of a gravity humps. *Science and Technology of Transport*. 2022;(2):47–49. (In Russ.).
7. Negrey V. Ya., Pozhidaev S. A., Filatov E. A. Research of the dynamics of rolling stock movement at the passage part of sorting piles to improve the safety and reliability of technological processes. *Problems and Prospects of Transport Systems and Construction Complex Development*. Gomel: Belarusian State University of Transport; 2013. P. 95–97. (In Russ.).
8. Kukushina N. A. Development of a methodology and calculation of the conditions for passing through gravity humps and curved sections of the track by articulated platforms. *Transport of the Russian Federation*. 2013;(45):71–75. (In Russ.).
9. Traction and passage of cars in curves of small radius and on sideslopes. Edited by Yu. A. Khapilov. *Proceedings of the All-Russian Research Institute of Railway Transport*. Issue 440. Moscow: Transport; 1971. 96 p. (In Russ.).
10. Klimov A. A., Osipov D. V. Modeling of the car passage without self-disengagement through the passage part of the gravity humps. *Modern Technologies. System Fnalysis. Modeling*. 2015;(47):154–160. (In Russ.).
11. Osipov D. V., Klimov A. A. Methodology for assessing the quality of the longitudinal profile of the passage part of a gravity hump. *Transport of the Urals*. 2015;(47):63–68. (In Russ.).
12. Osipov D. V., Klimov A. A. Program for assessing the quality of the longitudinal profile of the hump tracks 'Gorki Hump – Profile Verification'. *Chronicles of the Joint Fund of Electronic Resources Science and Education*. 2015;(79):119. (In Russ.).
13. Norms for the calculation and design of railway cars of the Ministry of Railways with a track gauge of 1,520 mm (non-self-propelled); with amendments and additions No. 1 (from 01.02.2000), No. 2 (from 01.03.02), and No. 3 (from 01.03.04). Moscow: GosNIIV–VNIIZhT; 1996. 318 p. (In Russ.).
14. GOST 33211–2014. Freight cars. Requirements for strength and dynamic qualities: interstate standard. Introduced 01.07.16. Research Institute of Railway Transport. Moscow: Standartinform; 2016. 54 p. (In Russ.).
15. GOST 32700–2020. Railway rolling stock. Methods of adhesion control: interstate standard. Introduced 01.12.20. Research Institute of Railway Transport. Moscow: Standartinform; 2020. 28 p. (In Russ.).

Информация об авторах

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

Д. В. Осипов – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Железнодорожные станции и узлы» Сибирского государственного университета путей сообщения.

О. Н. Числов – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Станции и грузовая работа» Ростовского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

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

D. V. Osipov – Candidate of Engineering, Associate Professor, Head of the Railway Stations and Junctions Department, Siberian Transport University.

O. N. Chislov – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Stations and Freight Work Department, Rostov State Transport University.

Статья поступила в редакцию 11.11.2025; одобрена после рецензирования 18.11.2025; принята к публикации 20.11.2025.

The article was submitted 11.11.2025; approved after reviewing 18.11.2025; accepted for publication 20.11.2025.

Научная статья
УДК 625.465.04:625.42.09
doi:10.52170/1815-9265_2025_77_82

О резервах повышения пропускной способности железнодорожных линий при ускорении посадки-высадки пассажиров пригородных поездов

Сергей Петрович Вакуленко¹, Дмитрий Юрьевич Роменский^{2✉}, Андрей Дмитриевич Ершов³, Кирилл Антонович Калинин⁴, Павел Андреевич Красильников⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Российский университет транспорта, Москва, Россия

¹ post-iuit@bk.ru

² romensky@rut-miit.ru✉

³ mailrabochiy1@mail.ru

⁴ kalinin.k.a@mail.ru

⁵ krasilnikov-pa@rut-miit.ru

Аннотация. В статье представлено комплексное исследование резервов повышения пропускной способности железнодорожных линий на лимитирующих направлениях – ключевых экспортно ориентированных коридорах сети ОАО «РЖД». Основное внимание уделено анализу влияния пригородных пассажирских перевозок на эффективность смешанного движения, в частности замедлению общего поездопотока из-за длительных стоянок электропоездов на остановочных пунктах с низкими платформами. В работе сформулирована и проверена гипотеза о том, что определенная часть пропускной способности железнодорожных линий может быть высвобождена не за счет дорогостоящего инфраструктурного расширения путевого развития, а за счет технологической модернизации пригородных перевозок.

Для проверки гипотезы проведен детальный анализ нормативных графиков движения на участках Восточно-Сибирской и Забайкальской железных дорог, где зафиксированы высокие размеры движения пригородных поездов (до 20 пар в сутки на некоторых участках) на фоне активного грузового потока. С использованием табличных расчетов и визуализации графиков движения были количественно оценены временные потери на участке Иркутск – Слюдянка, где разница во времени хода между пригородным и грузовым поездом достигает 18,5 мин, что напрямую приводит к съему 2–3 грузовых поездов в сутки. Дополнительно проведено сегментирование пассажиропотока по времени посадки-высадки в зависимости от уровня платформы и типа подвижного состава.

На основе полученных данных смоделирован сценарий внедрения электропоездов с переменным уровнем пола, позволяющий сократить время стоянок на 30–50 %. Результаты показывают, что даже без строительства новых путей или станций можно существенно повысить провозную способность лимитирующих направлений. В заключение предложены практические рекомендации по модернизации подвижного состава, поэтапному переходу на высокие платформы и оптимизации остановочного режима пригородных поездов.

Ключевые слова: пропускная способность, пригородные перевозки, электропоезда, переменный уровень пола, лимитирующие направления, оптимизация, железнодорожная инфраструктура, съём грузовых поездов

Для цитирования: О резервах повышения пропускной способности железнодорожных линий при ускорении посадки-высадки пассажиров пригородных поездов / С. П. Вакуленко, Д. Ю. Роменский, А. Д. Ершов, К. А. Калинин, П. А. Красильников // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 5 (77). С. 82–91. DOI 10.52170/1815-9265_2025_77_82.

Original article

Potential for increasing railway line capacity through accelerated passenger boarding in commuter trains

Sergey P. Vakulenko¹, Dmitry Yu. Romenskiy^{2✉}, Andrey D. Ershov³, Kirill A. Kalinin⁴, Pavel A. Krasilnikov⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Russian University of Transport, Moscow, Russia

¹ post-iuit@bk.ru

² romensky@rut-miit.ru✉

³ mailrabochiy1@mail.ru

⁴ kalinin.k.a@mail.ru

⁵ krasilnikov-pa@rut-miit.ru

Abstract. The article presents a comprehensive study of capacity reserves on bottleneck railway routes—key export-oriented corridors of Russian Railways (RZD). The primary focus is on analyzing the impact of suburban passenger services on the efficiency of mixed traffic, particularly the slowdown of overall train flow caused by prolonged dwell times of electric trains at stops equipped with low platforms. The study formulates and tests the hypothesis that a significant portion of railway line capacity can be unlocked not through costly infrastructure expansion, but by modernizing suburban transport technologies.

To verify this hypothesis, a detailed analysis of scheduled train timetables was conducted on sections of the East Siberian and Trans-Baikal Railways, where suburban train traffic reaches up to 20 train pairs per day alongside intensive freight operations. Using tabular calculations and visualized train diagrams, time losses were quantified: on the Irkutsk–Slyudyanka section, the travel time difference between a suburban and a freight train reaches 18.5 minutes, directly resulting in the displacement of 2–3 freight trains per day. Additionally, passenger boarding-alighting times were segmented based on platform height and rolling stock type.

Based on these findings, a scenario involving the deployment of electric trains with variable floor height was modeled, demonstrating a potential reduction in dwell times by 30–50%. The results indicate that substantial increases in line capacity on bottleneck corridors are achievable without constructing new tracks or stations. The paper concludes with practical recommendations for rolling stock modernization, phased transition to high platforms, and optimization of suburban train stopping patterns.

Keywords: railway capacity, commuter transport, electric trains, variable floor height, bottleneck routes, optimization, railway infrastructure, freight train displacement

For citation: Vakulenko S. P., Romenskiy D. Yu., Ershov A. D., Kalinin K. A., Krasilnikov P. A. Potential for increasing railway line capacity through accelerated passenger boarding in commuter trains. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(77):82–91. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_77_82.

Введение

Как известно, важнейшие направления экспортно ориентированных перевозок грузов по сети ОАО «РЖД» относятся к лимитирующим направлениям, т. е. являются коридорами с ограниченной пропускной и перерабатывающей способностью [1]. К этим направлениям относятся железнодорожные магистрали так называемого Восточного полигона, а также прочие магистрали, идущие в направлении морских портов Черноморского побережья и Балтийского моря. В развитие инфраструктуры железнодорожных линий, входящих в перечисленные коридоры, и технологий перевозки грузов вкладываются колоссальные средства с учетом их стратегической значимости для экономики России. Инвестиции идут на строительство дополнительных главных путей, а также на обеспечение увеличения длин и масс поездов, выражающееся в развитии промежуточных и технических станций, электрификации участков, закупке новых локомотивов и т. д.

Научно-технический прогресс в части интенсификации грузовых перевозок на ограниченной инфраструктуре идет по пути внедрения таких технологий, как виртуальная сцепка [2, 3], тяжеловесное [4] и длинносоставное движение [5, 6], а также полигонные технологии [7, 8]. Консенсус российской научной школы управления перевозками на магистральных железных дорогах строится вокруг принципа дальнейшего увеличения грузонапряженности на существующих линиях, что сталкивается с упомянутой выше проблемой увеличения инвестиций в инфраструктуру.

Стоит отметить, что все без исключения линии с исчерпанной пропускной способностью остаются линиями со смешанным движением грузовых и пассажирских поездов, где приоритет отдается пропуску потока грузовых поездов, а развитие пассажирских перевозок происходит в консервативном ключе, в основном через обновление парка подвижного состава, без кардинального изменения качества перевозок. Технологии пассажирских перевозок на таких железнодорожных участках не менялись последние 30–50 лет (с момента перехода с паровой тяги на современную электрическую и дизельную) по объективной причине – достижении предела увеличения скоростей и предельных значений загруженности железнодорожных линий. Выходом из такой ситуации могла бы стать специализация железнодорожных линий на грузовые и пассажирские, как со строительством новых пассажирских магистралей в формате ВСМ [9], со снятием всех инфраструктурных ограничений, так и без такого строительства [10], что сопряжено с сохранением многих ограничений.

Материалы и методы исследования

Предметом исследования в данной статье является система организации пригородных пассажирских перевозок на линиях с исчерпанной пропускной способностью, к которым главным образом относятся линии Восточного полигона ОАО «РЖД» [11]. Актуальность изучения данного вопроса связана с тем, что увеличение провозной способности в грузовом движении связано с реализацией крайне дорогостоящих инфраструктурных мероприятий при наличии

Рассмотрим более подробно схемы железнодорожных узлов, представленные на рис. 1. Это две типичные топологии железнодорожных пригородных участков с движением пригородных электропоездов, примыкающих к столице региона. Особенностью первого варианта является расположение сортировочной станции, наряду с главной пассажирской станцией, в границах города. У таких городов могут быть, а могут и не быть построены железнодорожные обходы для грузовых поездов, используемые только для пропуска транзитных грузовых поездов без переработки. Обычно такие обходы построены в однопутном исполнении. На рис. 1 перечислены примеры таких городов.

Эти два варианта отличаются местом расположения участка с максимальными размерами движения поездов. В первом случае (см. рис. 1, *а*) из-за сохранения сортировочной станции в городской черте движение пригородных поездов даже в зонах «окраина», «пригород», «дачи» проходит по линиям с интенсивным движением грузовых поездов и ограничения пропускной способности возникают на всем протяжении участка следования электропоездов. Во втором случае (см. рис. 1, *б*), благодаря выносу движения грузовых поездов на обход (полному или частичному), центральный участок узла имеет резервы пропускной способности и реальные ограничения на движение пригородных поездов возникают за пределами обхода при следовании от города. Обычно это несколько перегонов после примыкания обхода, т. е. 1–3 пригородные зоны.

На рис. 2 представлен фрагмент нормативного графика движения поездов двухпутной железнодорожной линии на Восточно-Сибирской железной дороге. Этот и другие аналогичные участки вблизи столиц субъектов РФ характеризуются наличием существенного количества пригородных электропоездов в графике движения. На примере поезда 6329, следующего в сторону столицы региона, можно увидеть съём трех грузовых поездов (показаны синим цветом) и отклонение основного потока грузовых поездов на обход на верхних перегонах 1 и 2.

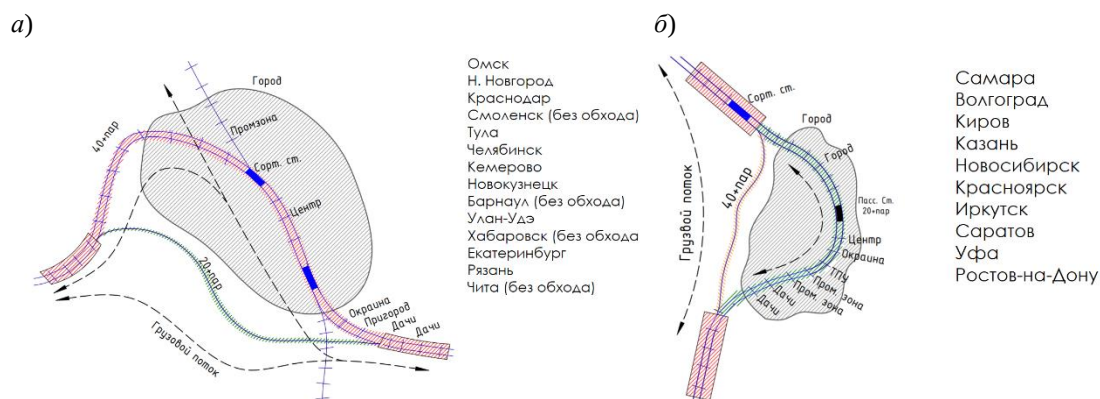


Рис. 1. Схема зонирования пригородных участков в железнодорожных узлах крупных агломераций: а – узлы без ж.-д. обхода или с ж.-д. обходом, но с расположением сортировочной станции в центре узла; б – узлы с ж.-д. обходом и расположением сортировочной станции на входе в узел

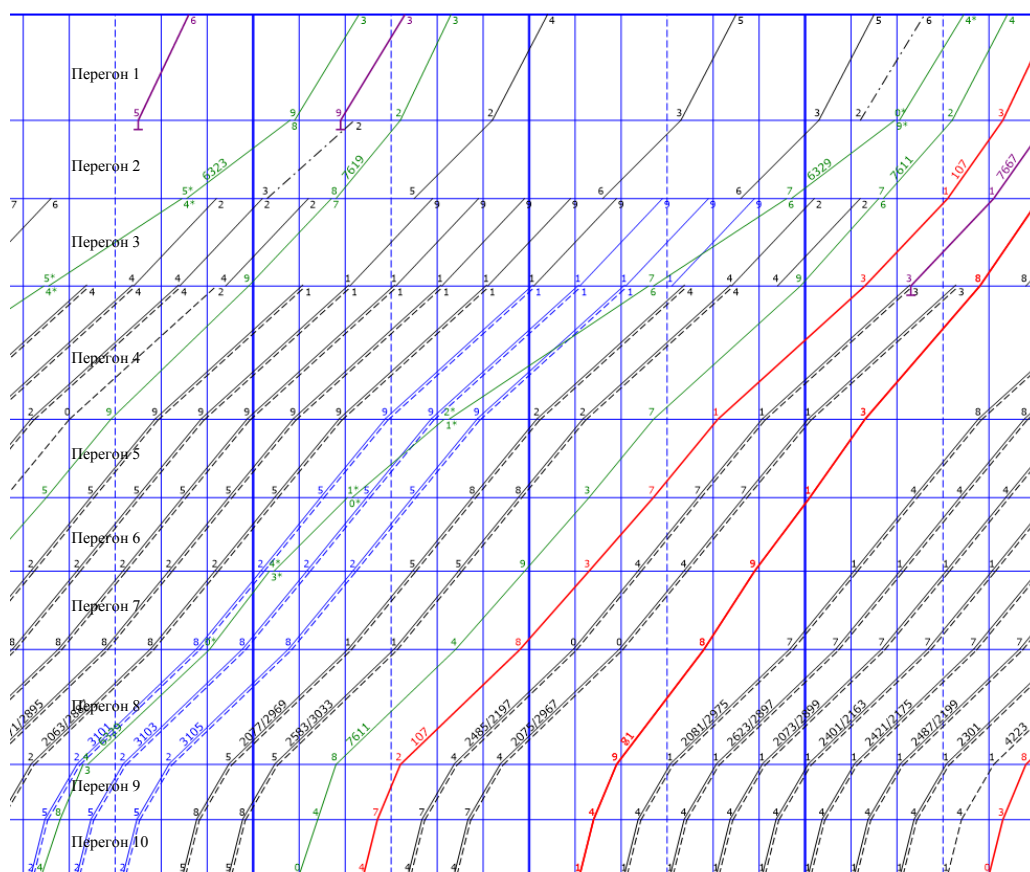


Рис. 2. Съём грузовых поездов пригородными на одном из участков Восточно-Сибирской железной дороги

Пассажирские поезда дальнего следования идут в общем потоке и дают съём в зависимости от категории поезда (поезда 107 и 81). Ситуация, показанная на рис. 2, наиболее характерна для городов с активно используемым грузовым обходом (см. рис. 1, б), где наибольшие трудности с организацией движения поездов возникают на перегонах 3, 4, 5, 6, до которых следует наибольшее количество пригородных электропоездов.

Обратим внимание на еще одну особенность работы таких участков, заключающуюся в обилии остановочных пунктов на перегонах. В табл. 1 подробно представлены затраты времени на продвижение электропоезда по модельному участку с обилием остановочных пунктов в районе дачных поселков и зон отдыха. Как видно из таблицы, такие остановочные пункты замедляют ход пригородного электропоезда примерно на 1–2 мин на каждую остановку.

На рис. 3 представлен другой фрагмент нормативного графика движения поездов двухпутной железнодорожной линии на Забайкальской

железной дороге. Этот участок имеет другую особенность: количество пригородных поездов не превышает 5 пар в сутки, а поездопоток является более равномерным. Однако даже в такой ситуации пригородный поезд движется по участку медленнее грузового.

Таблица 2 содержит более подробное представление затрат времени на продвижение электропоезда по участку с отдельными остановочными пунктами на перегонах, остановки на которых увеличивают время хода пригородного поезда на указанные в таблице значения.

На пригородных участках, оборудованных высокими пассажирскими платформами, таких как Московский и Петербургский железнодорожные узлы, выявлена минимальная разница времени хода между пригородными и грузовыми поездами, кроме того, пригородные поезда не дают такого заметного замедления грузовых поездов. По результатам анализа восьми пригородных участков разница времени хода по участкам между пригородными и грузовыми поездами не превышает 5–8 %.

Таблица 1

Разница времен хода грузового и пригородного поездов на рассматриваемом железнодорожном участке Восточно-Сибирской железной дороги

Перегон	Остановки	Время хода пригородного поезда, мин	Время хода грузового поезда, мин	Разность времен хода пригородного и грузового поездов
Станция И – станция К	Станция И.	14	–	–
	О. п. 1			
	О. п. 2			
Станция К – станция Г	Станция К	21	–	–
	О. п. 3			
	О. п. 4			
	О. п. 5			
	О. п. 6			
Станция Г – станция Б	Станция Г	27	18	9
	О. п. 7			
	О. п. 8			
	О. п. 9			
	О. п. 10			
	О. п. 11			
	О. п. 12			
Станция Б – станция П	Станция Б	39	32	7
	О. п. 13			
	О. п. 14			
	О. п. 15			
	О. п. 16			
	О. п. 17			
	О. п. 18			
	О. п. 19			
	О. п. 20			
	О. п. 21			
	О. п. 22			
Станция П – станция Л	Станция П	19	14	5
	О. п. 23			
	О. п. 24			
	О. п. 25			
Станция Л – станция А	Станция Л	14	13	1
	О. п. 26			
Станция А – станция Д	Станция А	15	14	1
Станция Д – станция С	Станция Д	26	25	1
	О. п. 27			
	О. п. 28			
	О. п. 29			
	О. п. 30			
	О. п. 31			
Станция С – станция Ш	О. п. 32	8	7	1
	Станция С			
	Станция Ш			

Результаты исследования и их обсуждение

Представленный анализ разницы времен хода доказывает факт съема грузовых поездов пригородными на участках с интенсивным смешанным движением поездов при наличии у пригородных поездов большого количества

остановок на маршруте. В отличие от пригородных участков, где внедрены высокие пассажирские платформы и участковая скорость пригородного и грузового поезда почти одинакова, на участках сети железных дорог с низкими пассажирскими платформами даже

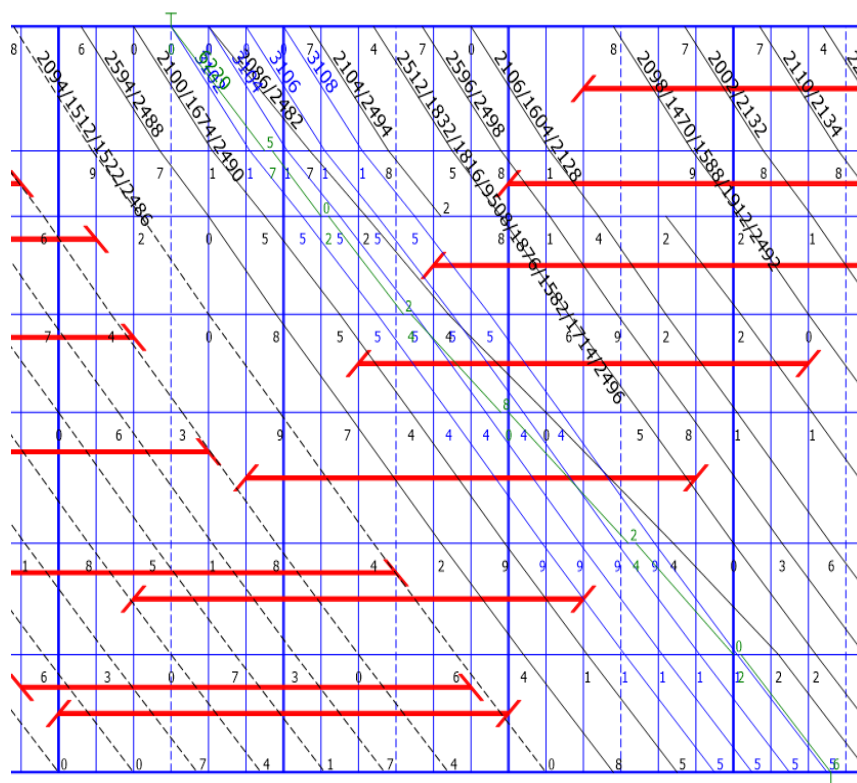


Рис. 3. Съем грузовых поездов пригородными на одном из участков Забайкальской железной дороги

Таблица 2

Разница времен хода грузового и пригородного поездов на рассматриваемом железнодорожном участке Забайкальской железной дороги

Перегон	Остановки	Время хода пригородного поезда, мин	Время хода грузового поезда, мин	Разность времен хода пригородного и грузового поездов
Станция З – станция Д	Станция З	25	21	4
	О. п. 1			
Станция Д – станция У	Станция Д	13	13	0
	О. п. 2			
	Станция У			
Станция У – станция Ю	Станция Ю	20	18	2
Станция Ю – станция Н	О. п. 3	24	19	5
	Станция Н			
Станция Н – станция С	О. п. 4	32	25	7
	О. п. 5			
	Станция С			
Станция С – станция К	О. п. 6	26	22	4
	Станция К			
Станция К – станция Я	Станция Я	24	24	0

при небольших пассажиропотоках время посадки в электропоезд и высадки увеличивается до величин, указанных в табл. 1 и 2.

Анализ практики работы пригородных участков позволил произвести сегментирование пассажиров пригородных поездов по времени их посадки в электропоезд с высокой и с низкой платформы и высадки из него (рис. 4).

Продолжение закупки и эксплуатации морально устаревшего подвижного состава, не предназначенного для эксплуатации на участках с низкими пассажирскими платформами (серии электропоездов ЭПЗД, ЭП2Д, дизельпоездов РА-3 и ДП2Д), увеличивает время хода поездов и снижает провозную способность лимитирующих направлений.

Физически крепкий пассажир	0,03 мин
Пенсионер, мама с ребенком	0,05 мин
Группа из 5-10 пассажиров	0,16 мин
Физически крепкий пассажир	0,15 мин
Пенсионер, мама с ребенком	0,25 мин
Группа из 5-10 пассажиров	1,10 мин

Разница в скорости посадки пассажиров становится ощутимой величиной при больших размерах движения поездов

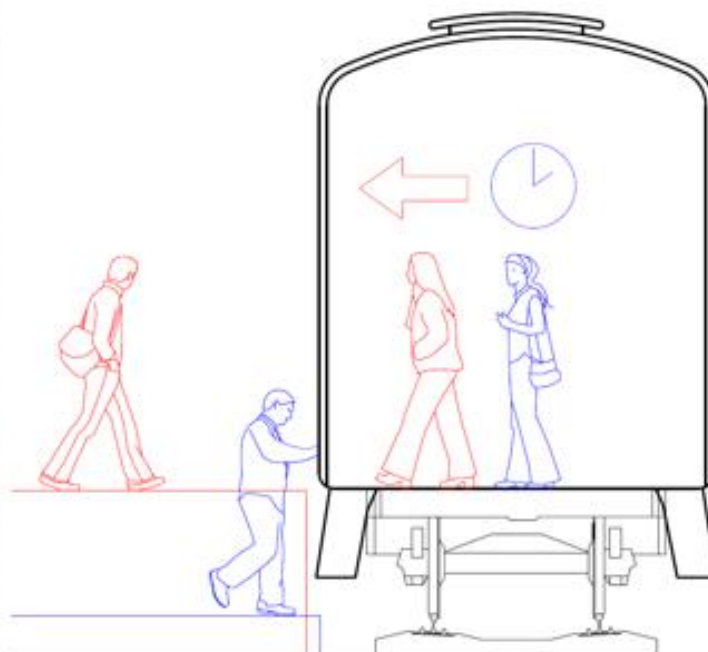


Рис. 4. Процесс посадки пассажиров в пригородные поезда с низких платформ и высадки из них

На рис. 5 представлены результаты расчета разницы времени хода электропоезда в двух ситуациях: при наличии разницы уровня пола и платформы и без такой разницы (ускорение посадки-высадки). Ускорить посадку пассажиров можно, выровняв между собой уровень пола вагона пригородного поезда и высоту платформ. Этого можно достичь закупкой низкопольного подвижного состава или перестройкой пассажирских платформ в высокие. Так, на участке Иркутск-Пасс. – Слюдянка-2 итоговая разница времени хода при указанном выше ускорении посадки составила 18,5 мин, что эквивалентно ликвидации съема от одной пары пригородных поездов до трех пар грузовых поездов.

Исследование подтверждает наличие существенных резервов повышения пропускной способности на лимитирующих направлениях без капитальных вложений в инфраструктуру. Внедрение подвижного состава, предназна-

ченного для обращения по участкам с низкими платформами, сокращает время стоянки на каждом остановочном пункте на 30–50 % и повышает безопасность пассажиров, что напрямую увеличивает пропускную способность линий. Подобный подвижной состав внедрен, например, на Белорусской железной дороге. Это составы серий ЭПр, ЭПг, ЭПм производства корпораций Stadler и Pesa.

По результатам проведенного исследования можно рекомендовать ОАО «РЖД» обновлять подвижной состав на ключевых направлениях, внедрять высокие платформы на пригородных станциях, оптимизировать графики движения и сокращать количество малоинтенсивных остановок. Эти меры позволят повысить грузонапряженность стратегически важных коридоров, направленных на границы с КНР, Монголией и морские порты, обеспечивая максимальную эффективность использования существующей инфраструктуры.

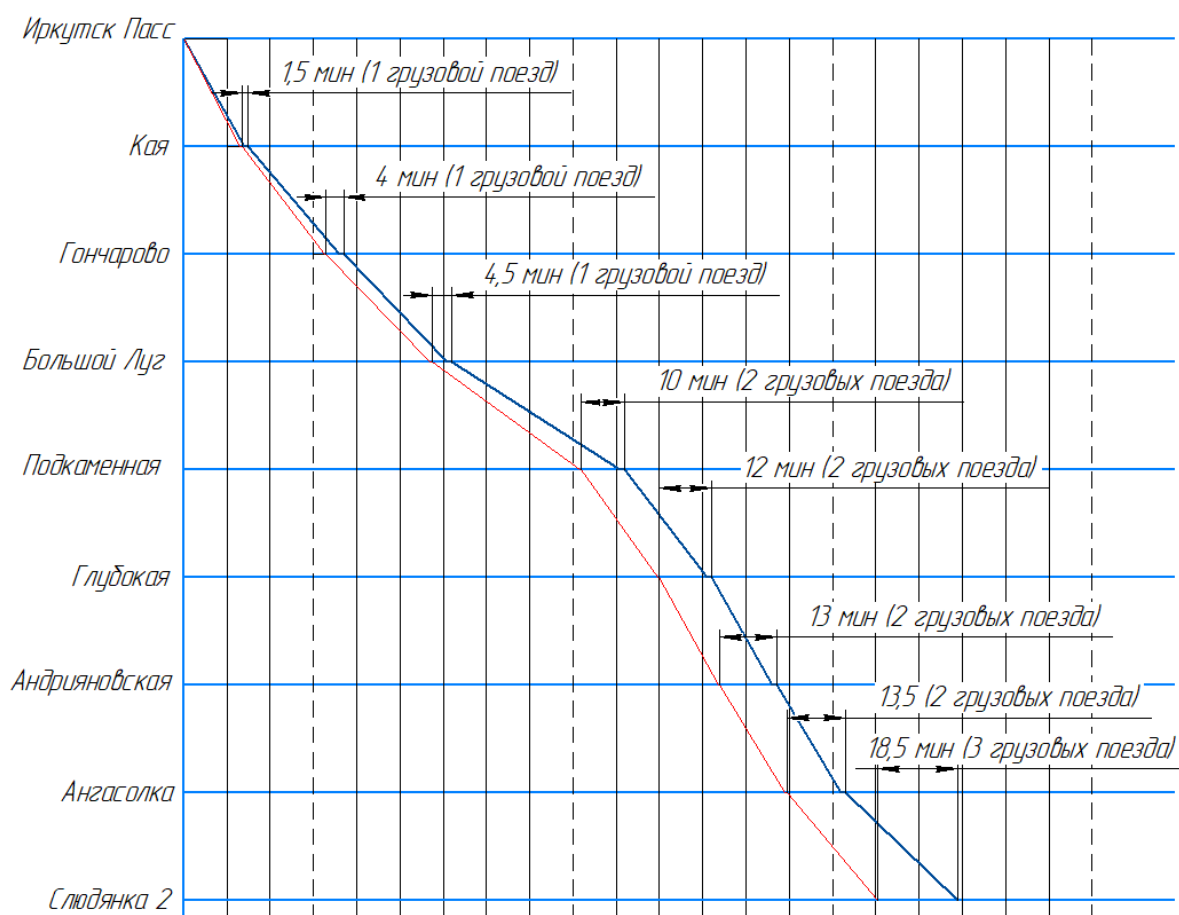


Рис. 5. Потенциал ускорения нитки пригородного поезда за счет сокращения времени стоянки на примере участка Иркутск – Слюдянка

Выводы

1. На участках с интенсивным смешанным движением (особенно вблизи крупных агломераций) необходимо производить поэтапную замену устаревших пригородных электропоездов, не адаптированных к низким платформам, на современные модели с переменным уровнем пола. Это позволит сократить время стоянок на 30–50 % и высвободить пропускную способность для 2–3 дополнительных грузовых поездов в сутки без строительства новых путей.

2. В рамках программ развития пригородных перевозок следует планировать поэтапную реконструкцию остановочных пунктов с низкими платформами, особенно на перегонах с наибольшей плотностью движения (например, на участках Иркутск – Слюдянка). Это повысит скорость посадки-высадки и устранил один из ключевых факторов замедления поездопотока.

3. Необходимо пересмотреть количество и расположение остановок на участках с высокой концентрацией пригородных поездов. Сокращение малозагруженных остановочных пунктов (особенно в зонах дачной застройки и отдыха) без ущерба для пассажирской доступности позволит сократить общее время хода и уменьшить съём грузовых поездов.

4. ОАО «РЖД» следует рассматривать модернизацию пригородного сегмента не как изолированную пассажирскую задачу, а как стратегический инструмент повышения эффективности всей транспортной системы на экспортно ориентированных коридорах. Включение показателей «время стоянки» и «разница во времени хода» в систему мониторинга пропускной способности позволит оперативно выявлять узкие места и принимать управленческие решения.

Список источников

1. Мугинштейн Л. А., Мехедов М. И. Методические подходы к выявлению факторов, влияющих на стабильность пропуска поездопотоков // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2014. № 2. С. 24–33. EDN TOLGZT.
2. Принципы построения и модели системы автоматического управления вторым локомотивом при виртуальной сцепке / Л. А. Баранов, П. Ф. Бестемьянов, Е. П. Балакина, О. Е. Пудовиков // Автоматика на транспорте. 2022. Т. 8, № 4. С. 377–388. DOI 10.20295/2412-9186-2022-8-04-377-388. EDN BPHMQR.
3. Методика выбора длины виртуальной сцепки по требованиям безопасности в интеллектуальных системах управления движением поездов / Л. А. Баранов, П. Ф. Бестемьянов, Е. П. Балакина, О. Е. Пудовиков // Проблемы управления безопасностью сложных систем : материалы XXX Международной конференции, Москва, 14 декабря 2022 г. / под общей редакцией А. О. Калашникова, В. В. Кульбы. Москва : Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2022. С. 261–267. DOI 10.25728/icss.2022.39.49.039. EDN VTХКТТ.
4. Мугинштейн Л. А., Шенфельд К. П. Опыт внедрения тяжеловесного движения на железных дорогах // Железнодорожный транспорт. 2016. № 3. С. 35–41. EDN VPIMXP.
5. Жухин Н. О., Пудовиков О. Е. Совершенствование алгоритмов управления скоростью движения длинносоставных грузовых поездов // Электротехника. 2021. № 9. С. 41–46. EDN ERBPSZ.
6. Пудовиков О. Е. Управление длинносоставными тяжеловесными грузовыми поездами // Управление большими системами. 2010. № 29. С. 214–231. EDN MSMJDZ.
7. Кирякин В. Ю., Новгородцева А. В. Полигонная технология формирования прогнозных вариантных графиков с использованием АПК ЭЛЬБРУС // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2014. № 1. С. 16–21. EDN RZVVHD.
8. Использование системы «ЭЛЬБРУС-Учебный» для подготовки студентов по специальности «Эксплуатация железных дорог» / С. П. Вакуленко, М. И. Мехедов, Д. Ю. Роменский [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2023. № 4. С. 50–54. EDN ITLVLC.
9. Калинин К. А. Совершенствование системы управления пассажирскими перевозками на полигонах со скоростным и высокоскоростным движением поездов : специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Калинин Кирилл Антонович. Москва, 2022. 251 с. EDN VFGXKA.
10. Оценка баланса провозной способности полигонов сети железных дорог / А. Ф. Бородин, В. В. Панин, М. А. Агеева [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2022. Т. 81, № 2. С. 158–169. DOI 10.21780/2223-9731-2022-81-2-158-169. EDN RDALYA.
11. Панин В. В. Комплексные меры по повышению эффективности использования инфраструктуры и росту провозной способности полигонов российских железных дорог // Логистика и управление цепями поставок. 2024. Т. 20, № 3. С. 50–59.
12. Роменский Д. Ю. Пригородно-городские железнодорожные пассажирские перевозки на диаметральных маршрутах крупных транспортных узлов (на примере Московского транспортного узла) : специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Роменский Дмитрий Юрьевич. Москва, 2021. 240 с. EDN QQHZBC.
13. Методологические основы технологии организации пригородно-городских пассажирских перевозок железнодорожным транспортом в крупных транспортных узлах (на примере Центрального транспортного узла: опыт и перспективы) : коллективная монография / С. П. Вакуленко, Д. Ю. Роменский, К. А. Калинин [и др.]. Москва : РУТ (МИИТ), 2023. 428 с. EDN FFIEBQ.

References

1. Muginshtein L. A., Mekhedov M. I. Methodological Approaches to Revelation of Factors Influencing the Stability of Train Flow Handling. *Railway Research Institute Bulletin*. 2014;(2):6–13. (In Russ.).
2. Baranov L. A., Bestemyanov P. F., Balakina E. P., Pudovikov O. E. Design Principles and Models of Automatic Control System for Second Locomotive at Virtual Assessment. *Transport Automation Research*. 2022;8(4):377–388. (In Russ.). DOI 10.20295/2412-9186-2022-8-04-377-388.
3. Baranov L. A., Bestemyanov P. F., Balakina E. P., Pudovikov O. E. Methodology for Selecting Virtual Coupling Length Based on Safety Requirements in Intelligent Train Control Systems. *Problems of Safety Control in Complex Systems: Proceedings of the 30th International Conference, Moscow, December 14, 2022*. Editors A. O. Kalashnikov,

V. V. Kulba. Moscow: Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences; 2022. P. 261–267. (In Russ.). DOI 10.25728/icss.2022.39.49.039.

4. Muginshteyn L. A., Shensfeld K. P. Experience in Implementing Heavy-Haul Rail Operations. *Railway Transport*. 2016;(3):35–41. (In Russ.).

5. Zhukhin N. O., Pudovikov O. E. Improving Algorithms for Controlling the Speed of Long Freight Trains. *Russian Electrical Engineering*. 2021;92(9):504–509. (In Russ.). DOI 10.3103/S1068371221090169.

6. Pudovikov O. E. Controlling long heavy freight trains. *Control of Large Systems*. 2010;(29):214–231. (In Russ.).

7. Kiryakin V. U., Novgorodceva A. V. Polygon technology of predictive variant graphs using hardware-software complex ELBRUS. *Bulletin of the United Scientific Council of Russian Railways*. 2014;(1):16–21. (In Russ.).

8. Vakulenko S. P., Mechedov M. I., Romensky D. Yu. [et al.]. Application of the ‘ELBRUS-Educational’ System in Training Students in Railway Operations. *Railway Transport*. 2023;(4):50–54. (In Russ.).

9. Kalinin K. A. Improving the Passenger Transportation Management System in Areas with High-Speed and Ultra-High-Speed Trains: Speciality 05.22.08 Transportation Management. Dissertation for the Degree of Candidate of Engineering. Kalinin Kirill Antonovich. Moscow; 2022. 251 p. (In Russ.).

10. Borodin A. F., Panin V. V., Ageeva M. A. [et al.]. Assessment of transportation capacity balance of railway network polygons. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(2):158–169. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-2-158-169>.

11. Panin V. V. Comprehensive measures to improve the efficiency of infrastructure use and increase the carrying capacity of Russian Railways. *Logistics and Supply Chain Management*. 2024;20(3):50–59. (In Russ.).

12. Romensky D. Yu. Suburban and Urban Rail Passenger Transport on Diameter Routes in Major Transport Hubs (Case Study of the Moscow Transport Hub). Speciality 05.22.08 Transportation Process Management: Dissertation for the Degree of Candidate of Engineering. Moscow; 2021. 240 p. (In Russ.).

13. Vakulenko S. P., Romensky D. Yu., Kalinin K. A. [et al.]. Methodological Foundations of Suburban and Urban Passenger Transport Organization by Rail in Major Transport Hubs (Case Study of the Central Transport Hub: Experience and Prospects). Collective monograph. Moscow: Russian University of Transport (MIIT); 2023. 428 p. (In Russ.).

Информация об авторах

С. П. Вакуленко – кандидат технических наук, профессор, заместитель директора Научно-исследовательского института транспорта Российского университета транспорта.

Д. Ю. Роменский – кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы» Российского университета транспорта.

А. Д. Ершов – старший преподаватель кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы» Российского университета транспорта.

К. А. Калинин – кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы» Российского университета транспорта.

П. А. Красильников – старший преподаватель кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы» Российского университета транспорта.

Information about the authors

S. P. Vakulenko – Candidate of Engineering, Professor, Deputy Director of the Research Institute of Transport, Russian University of Transport.

D. Yu. Romenskiy – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Transport Business Management and Intelligent Systems Department, Russian University of Transport.

A. D. Ershov – Senior Lecturer of the Transport Business Management and Intelligent Systems Department, Russian University of Transport.

K. A. Kalinin – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Transport Business Management and Intelligent Systems Department, Russian University of Transport.

P. A. Krasilnikov – Senior Lecturer of the Transport Business Management and Intelligent Systems Department, Russian University of Transport.

Статья поступила в редакцию 08.10.2025; одобрена после рецензирования 27.10.2025; принята к публикации 20.11.2025.

The article was submitted 08.10.2025; approved after reviewing 27.10.2025; accepted for publication 20.11.2025.

Научная статья
УДК 656.225
doi:10.52170/1815-9265_2025_77_92

Совершенствование способа применения резиновых подкладок для перевозки 40-футовых контейнеров в полувагонах

Максим Владимирович Корнеев^{1✉}, Павел Станиславович Бурдяк²

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

¹ korneevmv@sgups.stu.ru✉

² burdyakps@mail.ru

Аннотация. В статье изложены материалы по сбору, обработке и анализу данных о работе резиновых подкладок при перевозке крупнотоннажных контейнеров в универсальных железнодорожных полувагонах. Сбор и анализ данных выполнен на действующих контейнерных терминалах г. Новосибирска, осуществляющих прием контейнеров в полувагонах с мест погрузки на Дальнем Востоке. На основе данных о положении резиновых подкладок после перевозки определены случаи ухода с мест укладки резиновых подкладок и их повреждения, вызываемые взаимодействием контейнера и элементов конструкции полувагона. Приведено описание фактического положения подкладок и их повреждений. Сделаны выводы о причинах нарушения состояния и положения подкладок. Поставлены под сомнение принятые в действующих документах нормы количества резиновых подкладок, мест их расположения и порядок укладки. Представленные выводы и основания, изложенные в работе, свидетельствуют о возможности уменьшения потребного количества резиновых подкладок при использовании предлагаемой авторами шахматной схемы их расположения при организации перевозок 40-футовых контейнеров в универсальных полувагонах. Схема учитывает частоту ухода с мест укладки и особенности раскладки на полу вагона, а также повреждения, возникающие при взаимодействии контейнера с элементами кузова вагона. В работе представлены данные, выводы и предложения, которые требуют уточнения и проверки в ходе опытной перевозки. При положительном результате опытной перевозки ожидается значительное сокращение времени на выполнение операций по подготовке полувагонов к погрузке контейнеров и, как следствие, снижение себестоимости перевозки по такой технологии.

Ключевые слова: универсальные крупнотоннажные контейнеры, полувагон, реквизит крепления, резиновые прокладки, 40-футовый контейнер

Для цитирования: Корнеев М. В., Бурдяк П. С. Совершенствование способа применения резиновых подкладок для перевозки 40-футовых контейнеров в полувагонах // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 5 (77). С. 92–99. DOI 10.52170/1815-9265_2025_77_92.

Original article

Improving the method of using rubber linings for FEU-containers placement during transportation in gondola cars

Maksim V. Korneev^{1✉}, Pavel S. Burdyak²

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

¹ korneevmv@sgups.stu.ru✉

² burdyakps@mail.ru

Abstract. The article presents materials for collecting, processing and analyzing data on the operation of rubber linings during the transportation of large-capacity containers in universal railway gondola cars. Data was collected and analyzed at the existing container terminals in Novosibirsk, which receive containers in gondola cars from loading points in the Far East. Based on the data on the position of rubber linings after transportation, cases of leaving the places of laying rubber linings and their damage caused by the interaction of the container and the structural elements of the gondola car were determined. The description of the actual position of the linings and their damage is given. Conclusions were drawn on the causes of the violation of the condition and the position of the linings. The norms adopted in the current documents for the number of rubber linings, their locations and laying procedure are questioned. The presented conclusions and grounds set forth in the work indicate the possibility of reducing the required number of rubber linings using the checkerboard layout proposed by the authors when organizing the transportation of FEU-containers in universal gondola cars. The scheme takes into account the frequency of leaving the stacking places and the peculiarities of the layout on the floor of the car, as well as damage arising from the interaction of the container with the elements of the car body. The paper presents data, conclusions and suggestions for clarification and verification during trial transportation. With a positive result of trial transportation, it is expected to significantly reduce the time for operations to prepare gondola cars for loading containers and, as a result, reduce the cost of transportation using such technology.

Keywords: universal large-capacity containers, gondola cars, fastening props, rubber linings, FEU-container
For citation: M. V. Korneev, P. S. Burdyak Improving the method of using rubber linings for FEU-containers placement during transportation in gondola cars. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(77):92–99. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_77_92.

Введение

В 2021 и 2022 гг. в РФ появились новые способы размещения и крепления крупнотоннажных контейнеров в универсальных четырехосных полувагонах. Предлагаемые способы не смогли полностью удовлетворить участников рынка перевозок контейнеров в связи с достаточно высокими материальными и временными затратами на этапе подготовки к перевозке [1].

Для снижения себестоимости был предложен ряд мер по сокращению объема древесины при размещении и креплении контейнеров в железнодорожных полувагонах [2, 3]. Меры включали:

- уменьшение длины продольных брусьев и исключение второго продольного бруса при перевозке 40-футового контейнера;
- изменение конструкции распорной рамы, включающей два упорных и три-четыре распорных бруска сечением 100×150 мм.

Эти изменения позволили снизить расход древесины, себестоимость и время выполнения операций по погрузке контейнера [4]. Однако остался нерешенным вопрос использования 12 резиновых подкладок, укладываемых на пол вагона. Изучение этого аспекта является логическим продолжением оптимизации технологии перевозки. Целью работы является анализ и повышение эффективности технологии размещения и крепления контейнера путем оптимизации количества и расположения резиновых подкладок.

Материалы и методы исследования

Для анализа технологии перевозки контейнеров в полувагонах выполнен сбор информации о поездах, вагонах и контейнерах, поступающих в железнодорожных универсальных полувагонах на контейнерные терминалы, расположенные в грузораздельном районе (Новосибирский транспортный узел) [5].

Использование подкладок регламентируется местными техническими условиями (МТУ) для 40-футовых контейнеров массой до 36,0 т [6] и контейнеров типоразмеров 1СС, 1С, 1СХ массой до 30,48 т [7].

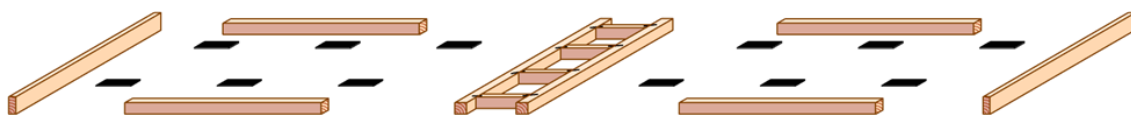
Для крепления применяют подкладки из листовой резины толщиной не менее 10 мм и размером не менее 200×300 мм. Их укладывают попарно на шкворневые, промежуточные и средние балки полувагона в местах опирания контейнера (рис. 1).

Места установки деревянного крепления могут отличаться [6, 7], но расположение резиновых подкладок неизменно для 20- и 40-футовых контейнеров.

В литературе отсутствуют данные о способах расчета количества подкладок [8]. Предполагается, что они нужны:

- для увеличения коэффициента трения между контейнером и полом вагона;
- исключения повреждения подвижного состава и контейнера в результате действия сил, возникающих при движении поезда.

а)



б)

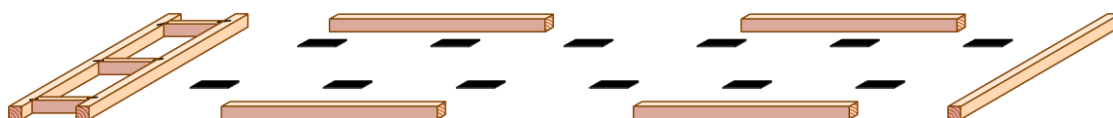


Рис. 1. Размещение резиновых подкладок в вагоне:
а – для двух 20-футовых контейнеров; б – для 40-футового контейнера

Сбор информации о расположении подкладок проводился авторами для ответа на вопросы:

1. Достаточно ли предусматриваемого МТУ количества подкладок для 40-футовых контейнеров?

2. Какова эффективность работы подкладок (наличие повреждений, смещение)?

3. Как определить минимальное количество подкладок для 40-футовых контейнеров?

Проанализированы маршруты поездов по направлению Дальний Восток – Западно-Сибирская железная дорога. Данные собирались с использованием камер видеофиксации, фотосъемки и осмотра вагонов. Для исключения искажения данных съем выполнялся непосредственно после извлечения контейнера. Для фиксации данных использована схема нумерации мест укладки с учетом двухрядного расположения резинок на поперечных балках вагона (рис. 2). Нумерация последовательная, с началом в месте расположения деревянной рамы.

Предполагается, что места расположения резиновых подкладок на одной балке полувагона друг напротив друга не имеют принципиального отличия ввиду симметричности кузова вагона, контейнера и укладки брусков вдоль боковой стенки вагона, препятствующих поперечному смещению.

Нахождение резиновой подкладки оценивалось по следующим критериям нарушения предполагаемого порядка использования:

- а) нахождение на балке;
- б) нахождение сбоку от балки;
- в) отсутствие на балке;
- г) отсутствие следов деформации на поверхности подкладки;
- д) деформация подкладки;

е) разрушение подкладки до состояния, не позволяющего ей выполнять свою функцию;

ж) нет данных.

Для отбора данных по критериям *а, б, в* выполнен съем данных с поверхности пола вагонов при помощи средств видеофиксации. Для отбора данных по критериям *г, д, е* выполнен съем данных с фотофиксацией повреждений.

Цель сбора информации о расположении резиновых подкладок – выявление случаев отсутствия соприкосновения между контейнером и дном полувагона, т. е. свободный сдвиг резиновой подкладки или отсутствие деформаций на ней. Сдвиг подкладки напрямую свидетельствует о свободном перемещении и отсутствии прижатия к балке полувагона. Отсутствие значимых следов повреждения (*г*) свидетельствует о незначительных воздействиях на резиновую подкладку, перемещению которой препятствовали поверхности вагона и контейнера.

Результаты исследования

Сбор информации о расположении резиновых подкладок выполнен в июле 2025 г. В ходе выгрузки обработано 72 полувагона. В части вагонов, ввиду темного цвета дна вагонов и резиновой подкладки, а также темного времени суток, не было возможности достоверно определить положение подкладок относительно поперечной балки.

На рис. 3 представлен пример расположения резиновых подкладок на дне полувагона. Здесь для примера выделено квадратом отсутствие резиновой подкладки на позиции *б*. Такой случай определен как отсутствие подкладки на месте (*в*).

Всего обработано 540 положений резиновых подкладок на полу вагона. Ввиду сложно-

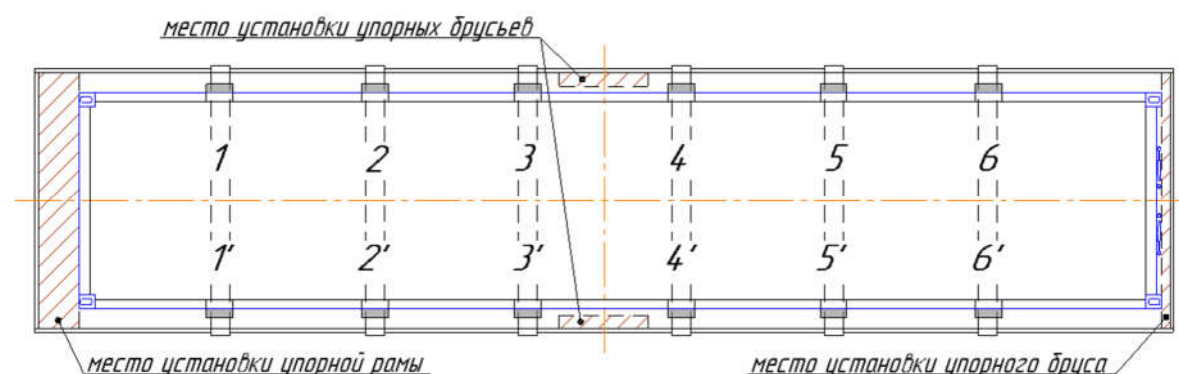


Рис. 2. Схема размещения мест укладки резиновых подкладок на полу вагона

сти набора необходимой информации данные рассмотрены не с позиции получения корреляционной зависимости, а с позиции формулировки предположений для дальнейшего использования при разработке новых МТУ и выполнения опытной перевозки.

Общее представление о нахождении подкладок после перевозки грузов позволяет получить гистограмма, приведенная на рис. 4.

Из диаграммы следует:

- распределение состояний *а, б, в, ж* неоднородно между номерами резиновых подкладок, некоторые нарушения встречаются чаще на определенных позициях;

- случаи отсутствия данных о подкладке редки и, по всей вероятности, связаны с невозможностью достоверной идентификации подкладки средствами фотофиксации из-за одинакового цвета подкладки и пола вагона;

- случаи отсутствия подкладки на своем месте редки и возможны, например, из-за прилипания резинки к элементам дна контейнера и извлечения вместе с ним;

- частота обнаружения резиновой подкладки на позициях 1, 2 выше, чем на позициях 3–6;

- частота потери места укладки (*б* и *в*) выше для позиций 3–6.

Это может указывать на разную нагрузку в ходе перевозки на подкладки, установленные на шкворневых (крайних позициях) и промежуточных (центральных позициях) балках вагона или особенностях их укладки.

На рис. 5 представлены данные без учета наличия подкладок на балке полувагона, а случаи сдвига или отсутствия подкладки на месте объединены, так как в любом из этих случаев функция подкладки не выполняется.



Рис. 3. Пример фотоизображения с пометкой отсутствия резиновой подкладки на месте ее укладки

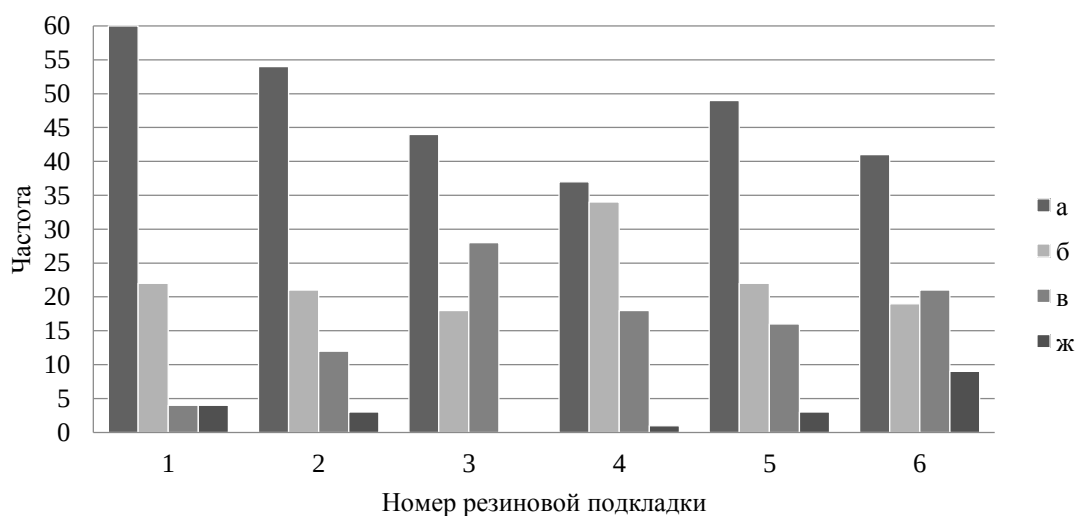


Рис. 4. Гистограмма частоты случаев расположения резиновых подкладок на позициях укладки

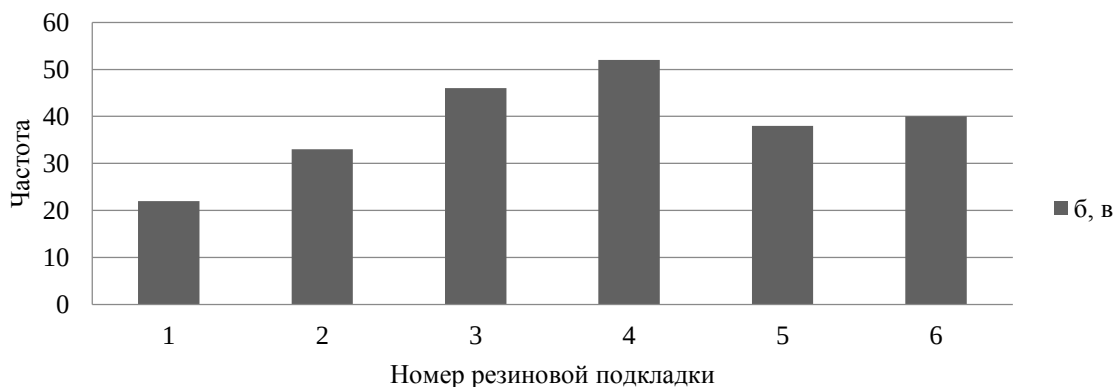


Рис. 5. Гистограмма частоты случаев отсутствия резиновой подкладки на позиции ее укладки

Рисунок 5 позволяет сделать предположение о сдвиге подкладок не только в ходе движения поезда, но и за счет особенностей позиционирования контейнера при его опускании в полувагон. Эта особенность заключается в необходимости прижатия контейнера к торцевому брусу с небольшим его сдвигом в сторону бруса.

На рис. 6 представлена круговая диаграмма, в которую сведены обобщенные данные о количестве резиновых подкладок, соответствующих критериям *а, б, в, ж*. Из диаграммы следует, что в половине случаев (47 %) установлены факты отсутствия резиновых подкладок на месте их укладки. Такая частота покидания места укладки косвенно указывает на отсутствие контакта между контейнером и полувагоном.

В ходе осмотра резиновых подкладок после перевозки контейнеров и продолжительного хранения на терминале установлено наличие до-

полнительных деформаций под действием солнечных лучей, температуры воздуха, особенно в местах деформаций.

В ходе данного исследования выполнен сбор резиновых подкладок сразу после выгрузки контейнеров из группы вагонов. Резиновые подкладки были отсортированы по трем критериям: *г, д, е*.

На рис. 7 приведены примеры резиновых подкладок, отнесенных к одной из трех групп. Всего обработано 115 резиновых подкладок.

В результате обработки данных о 115 резиновых подкладках сформирована круговая диаграмма случаев деформации резиновых подкладок (рис. 8).

Из анализа состояния резиновых подкладок после перевозки контейнеров в полувагонах сделан вывод о незначительной доле повреждений, которая составляет 6 %.

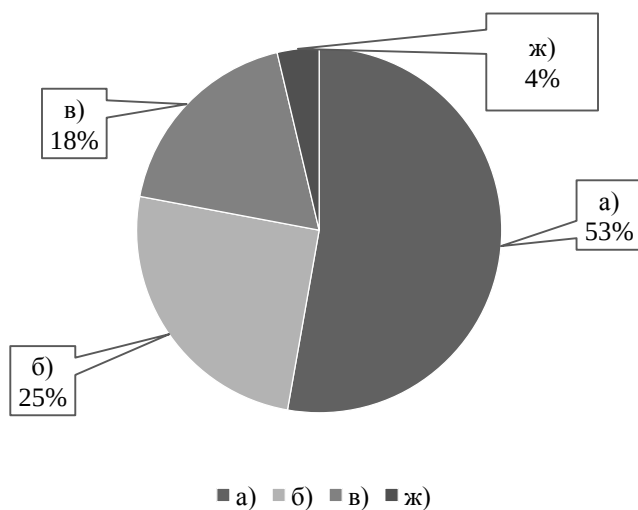


Рис. 6. Диаграмма распределения случаев нахождения резиновых подкладок

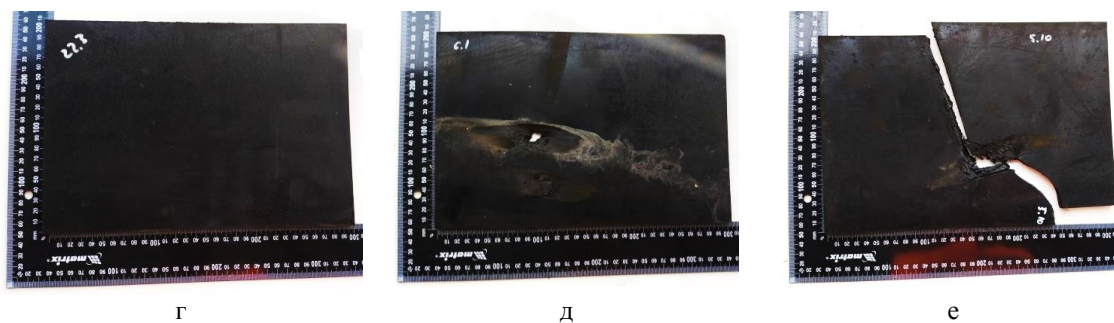


Рис. 7. Резиновые подкладки:
г – без следов деформации; д – с деформацией; е – разрушенная подкладка



Рис. 8. Диаграмма распределения случаев повреждения резиновых подкладок

Выводы

Выполненное исследование по анализу данных о работе резиновых подкладок при перевозке крупнотоннажных контейнеров в универсальных железнодорожных полувагонах позволяет сделать следующие основные выводы:

1. На позициях ближе к торцевому брусу наблюдается более частое смещение подкладок. Для снижения смещений предлагается расположить подкладку вдоль боковой стенки длинной стороной.

2. Наиболее частая потеря места укладки зафиксирована на позициях 3, 3' и 4, 4':

- из-за расположения шкворневых балок выше промежуточных и средних;
- отсутствия значительного прогиба контейнера.

3. Частота обнаружения резиновой подкладки на позициях 1 и 2 выше, чем на позициях 3–6. Данное наблюдение, как и наблюдение 1, возможно, связано и с несимметричностью расположения контейнера в полувагоне.

4. Для вагонов без люков, с большим количеством балок размещение подкладок целесообразно производить только на четных балках полувагона.

5. Выявленные зависимости видов нарушений порядка использования резиновых подкладок указывают на неоднородность условий опирания контейнера. Для исключения неэффективной работы подкладок необходима система ориентиров в вагоне для правильного позиционирования подкладки под боковые элементы контейнера.

6. Деформация подкладок зафиксирована в 6 % случаев, что меньше принятого запаса в 25 % [9–11]. Для таких повреждений следует проводить выборочный контроль с лабораторным анализом извлеченных из вагона подкладок на жесткость, остаточную деформацию и трение.

7. На основе данных диаграмм, приведенных на рис. 6, 8, и выводов, сделанных выше, предложена гипотеза о возможности уменьшения количества резиновых подкладок без потери влияния на сохранность элементов вагона и контейнера.

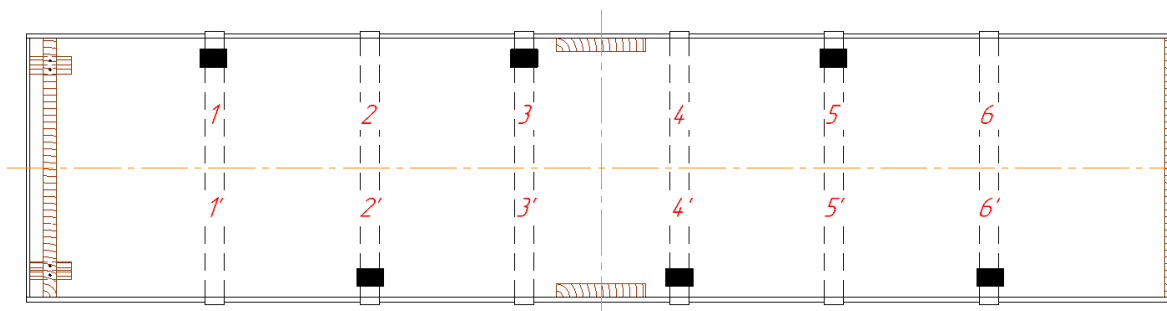


Рис. 9. Вариант шахматного размещения резиновых подкладок

В качестве исходной композиции размещения подкладок предлагается схема, представленная на рис. 9.

Шахматный порядок расположения резиновых подкладок ($1-2-3-4-5-6$) служит для уменьшения расстояния между опорами на балки вагона. Как показал вышеприведенный анализ, раскладка на все опоры сопровождается регулярной потерей места укладки. Предлагаемая схема раскладки сокращает риск превышения допустимых нагрузок на одну поперечную балку полувагона за счет расположения подкладок в шахматном порядке.

Вариант раскладки, приведенный на рис. 9, позволяет снизить вероятность потери места расположения подкладки за счет давления контейнера на них по схеме треугольников $3-4-5$ и $4-5-6$, которые характеризуются наиболее вероятной потерей места укладки.

Проведенный анализ существующей технологии размещения и крепления контейнера в железнодорожном полувагоне показал возможность уменьшения до шести штук количества резиновых подкладок за счет предлагаемой авторами шахматной схемы раскладки. Данная схема требует проверки опытными перевозками.

Список источников

1. Корнеев М. В., Бурдяк П. С. Анализ существующих и предлагаемых способов размещения и крепления крупнотоннажных контейнеров в универсальных железнодорожных полувагонах // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 2 (69). С. 71–79. DOI 10.52170/1815-9265_2024_69_71.
2. Корнеев М. В., Бурдяк П. С. Формирование требований к креплению контейнеров в полувагонах для развития транспортного рынка Сибири и Дальнего Востока // Вопросы новой экономики. 2024 № 2 (70). С. 40–48. DOI 10.52170/1994-0556_2024_70_40.
3. Кабукин Н. Ю. Инновационные реквизиты крепления груза при перевозке в вагонах // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2024. № 3 (10). С. 16–22.
4. Кабукин Н. Ю. Альтернативные средства крепления при перевозке в вагонах // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2023. № 3 (10). С. 16–22. DOI 10.52170/2712-9195_2023_3_16.
5. Об утверждении местных технических условий размещения и крепления крупнотоннажных контейнеров длиной 40 футов массой брутто до 36,0 т в универсальных полувагонах : распоряжение Центра фирменного транспортного обслуживания ОАО «РЖД» от 17.10.2022 № ЦФТО-210/р : (ред. от 10.09.2024) : (вместе с Местными техническими условиями). URL: <https://clck.ru/3Nh3zw> (дата обращения: 04.10.2025).
6. Выбор способов управления потоками энергетических ресурсов на континенте Евразия / А. В. Дмитренко, Е. В. Лесных, А. С. Лесных, М. В. Корнеев // Проблемы электроэнергетики и телекоммуникаций Севера России : сборник трудов IV Международной научно-практической конференции, Сургут, 20–21 апреля 2023 года. Москва : Знание-М, 2023. С. 230–239. EDN PSGIWE.
7. Об утверждении местных технических условий размещения и крепления универсальных контейнеров типоразмеров 1СС, 1С, 1СХ массой брутто до 30,48 т в универсальных полувагонах : распоряжение Центра фирменного транспортного обслуживания ОАО «РЖД» от 26.12.2022 № ЦФТО-278/р : (ред. от 28.08.2024) : (вместе с Местными техническими условиями). URL: <https://clck.ru/3Nh493> (дата обращения: 04.10.2025).
8. ГОСТ 7338–90. Пластины резиновые и резинотканевые. Технические условия : утвержден Постановлением Госстандарта СССР от 13 июня 1990 г. № 1528. Москва, 1990.
9. Туранов Х. Т. Новая методика расчета устойчивости груза на железнодорожной платформе при наличии гибких элементов креплений // Транспорт: наука, техника, управление. 2015. № 3. С. 44–47.

10. Технические условия размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах. Москва : Юртранс, 2003. 544 с.
11. Корнеев М. В., Хорунжин С. Ю. Совершенствование условий перевозок металлопродукции железнодорожным транспортом // Известия Транссиба. 2010. № 2. С. 101–105.

References

1. Korneev M. V., Burdyak P. S. Analysis of existing and proposed methods of placing and securing large-capacity containers in universal railway gondolas. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(69):71–79. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_69_71.
2. Korneev M. V., Burdyak P. S. Formation of requirements for securing containers in gondola cars for the development of the transport market of Siberia and the Far East. *Issues of the New Economy*. 2024;(70):40–48. (In Russ.). DOI 10.52170/1994-0556_2024_70_40.
3. Kabukin N. Yu. Innovative details of cargo fastening during transportation in wagons. *Fundamental and Applied Transport Issues*. 2024. № 3 (10). pp. 16–22.
4. Kabukin N. Yu. Alternative means of fastening during transportation in wagons. *Fundamental and Applied Transport Issues*. 2023;(10):16–22. (In Russ.). DOI 10.52170/2712-9195_2023_3_16.
5. On approval of local technical conditions for the placement and fastening of large-capacity containers with a length of 40 feet and a gross weight of up to 36.0 tons in universal gondolas. Order of the Russian Railways Corporate Transport Service Center dated 17.10.2022 no. CFTO-210/r (as amended on 10.09.2024). (Together with Local Technical Conditions). (In Russ.). URL: <https://clck.ru/3Nh3zw>.
6. Dmitrenko A. V., Lesnykh E. V., Lesnykh A. S., Korneev M. V. Selection of methods for managing the flows of Energy Resources on the Continent of Eurasia. *Problems of the Electric Power Industry and Telecommunications of the North of Russia: Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference, Surgut, April 20–21, 2023*. Moscow: Znanie-M; 2023. P. 230–239. (In Russ.).
7. On approval of local technical conditions for the placement and fastening of universal containers of standard sizes 1CC, 1C, 1CX with a gross weight of up to 30.48 tons in universal gondolas. Order of the Russian Railways Corporate Transport Service Center dated 12.26.2022 no. CFTO-278/r (as amended on 28.08.2024). (Together with Local Technical Conditions). (In Russ.). URL: <https://clck.ru/3Nh493>.
8. GOST 7338–90. Rubber and rubber-fabric plates. Technical Specifications. Approved by Resolution No. 1528 of the USSR State Standard of 13.06.1990. (In Russ.).
9. Turanov Kh. T. New methodology for calculating the stability of cargo on a railway platform in the presence of flexible fastening elements. *Transport: Science, Technology, Management*. 2015;(3):44–47. (In Russ.).
10. Specifications for placement and fastening of cargoes in cars and containers. Moscow: Yurtrans Law Firm; 2003. 544 p. (In Russ.).
11. Korneev M. V., Khorunzhin S. Yu. Improving the conditions for the transportation of metal products by rail. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2010;(2):101–105. (In Russ.).

Информация об авторах

М. В. Корнеев – кандидат технических наук, доцент кафедры «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав» Сибирского государственного университета путей сообщения.

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

Information about the authors

M. V. Korneev – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Logistics, Commercial Work and Rolling Stock Department, Siberian Transport University.

P. S. Burdyak – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Railway Stations and Junctions Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 27.10.2025; одобрена после рецензирования 01.12.2025; принята к публикации 04.12.2025.

The article was submitted 27.10.2025; approved after reviewing 01.12.2025; accepted for publication 04.12.2025.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья
УДК 624.21:624.042.4
doi:10.52170/1815-9265_2025_77_100

Особенности динамической работы пролетных строений пешеходных путепроводов над путями высокоскоростных железнодорожных магистралей

Никита Андреевич Лабути^{1✉}, Андрей Владимирович Ланг²,
Таисия Владимировна Васютина³, Юлия Петровна Касаджик⁴

^{1, 2} Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия

^{1, 2, 3, 4} «Инженерное бюро искусственных сооружений», Санкт-Петербург, Россия

¹ labutin@ebs-spb.tech✉

² lang@ebs-spb.tech

³ t_vasutina@ebs-spb.tech

⁴ kasadzhik@ebs-spb.tech

Аннотация. Пешеходные путепроводы над путями высокоскоростных железнодорожных магистралей являются одними из наиболее подверженных аэродинамическому воздействию высокоскоростных поездов сооружений. Ввиду знакопеременного волнового характера аэродинамического воздействия движущегося подвижного состава и относительно малой массы и жесткости рассматриваемых сооружений в последних может возникнуть существенная динамическая реакция.

Установлено, что аэродинамическое воздействие от движущегося поезда имеет сложный двухкомпонентный характер, состоящий из первичного возбуждения конструкции головной воздушной волной и вторичного возбуждения, связанного с периодичностью головной, хвостовой и промежуточной (для сдвоенных поездов) воздушных волн. Совпадение какой-либо из собственных частот конструкции с частотой первичного и/или вторичного возбуждения способно вызвать значительный динамический отклик конструкции, прямо влияющий на возможность его безопасной и комфортной эксплуатации.

В статье приводятся результаты исследований динамической реакции пешеходных путепроводов на аэродинамическое воздействие методами численного моделирования на примере проектируемого сооружения в составе вокзального комплекса высокоскоростной магистрали Санкт-Петербург – Москва. По результатам моделирования были определены максимальные величины ускорений, перемещений и динамических коэффициентов конструкции как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении.

Установлено, что величина динамической реакции конструкции определяется не только ее собственными характеристиками, но и параметрами высокоскоростного поезда (длиной и конфигурацией).

Также выявлена недостаточность существующей нормативной базы в части нормирования предельных ускорений в уровне прогожей части пешеходных мостов и путепроводов и вынесены предложения по актуализации существующей нормативной базы с выполнением соответствующих научно-исследовательских работ профильными институтами.

Ключевые слова: высокоскоростные магистрали, аэродинамика, динамика, высокоскоростной поезд, пешеходный путепровод, численное моделирование

Для цитирования: Особенности динамической работы пролетных строений пешеходных путепроводов над путями высокоскоростных железнодорожных магистралей / Н. А. Лабути, А. В. Ланг, Т. В. Васютина, Ю. П. Касаджик // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 5 (77). С. 100–110. DOI 10.52170/1815-9265_2025_77_100.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Dynamic performance of pedestrian overpass superstructures over high-speed railway tracks

Nikita A. Labutin^{1✉}, Andrey V. Lang², Taisia V. Vasutina³, Yulia P. Kasadzhik⁴

^{1, 2} Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, Russia

^{1, 2, 3, 4} Engineering Bureau of Artificial Structures, LLC, Saint Petersburg, Russia

¹ labutin@ebs-spb.tech✉

² lang@ebs-spb.tech

³ t_vasutina@ebs-spb.tech

⁴ kasadzhik@ebs-spb.tech

Abstract. Pedestrian overpasses over high-speed railway tracks are among the most aerodynamically exposed to high-speed trains. Due to the familiar wave nature of the aerodynamic action of moving rolling stock and the relatively small mass and rigidity of the structures under consideration, a significant dynamic reaction may occur in the latter

The aerodynamic effect of a moving train is found to have a complex two-component nature, consisting of the primary excitation of the head air wave structure and secondary excitation related to the periodicity of the head, tail and intermediate (for double trains) Air waves. The coincidence of any of the design frequencies with the primary and/or secondary excitation frequency may cause a significant dynamic response of the design to the effect, directly affecting the possibility of its safe and comfortable operation.

The article provides results of studies of dynamic reaction of pedestrian overpasses to aerodynamic impact by numerical modelling methods on the example of a planned structure in the train station complex of high-speed railway track Saint-Petersburg – Moscow. The maximum values of acceleration, displacement and dynamic coefficients in both horizontal and vertical directions were determined from the simulation results.

It was established that the magnitude of the dynamic reaction of the structure is determined not only by its own characteristics, but also by the parameters of the high-speed train (length and configuration).

It was also revealed the inadequacy of the existing regulatory framework for the normalization of maximum accelerations at the level of the passage of pedestrian bridges and overpasses, with proposals to update the existing regulatory framework with the implementation of appropriate scientific research work by relevant institutes

Keywords: high-speed railway tracks, aerodynamics, dynamics, high-speed train, pedestrian overpass, numerical modeling

For citation: Labutin N. A., Lang A. V., Vasutina T. V., Kasadzhik Yu. P. Dynamic performance of pedestrian overpass superstructures over high-speed railway tracks. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(77):100–110. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_77_100.

Введение

Особенностью объектов искусственных сооружений на высокоскоростных железнодорожных магистралях является необходимость восприятия динамических и аэродинамических воздействий [1]. Распределение воздушных масс вокруг движущегося подвижного состава подробно рассмотрено в трудах как отечественных, так и зарубежных исследователей [2–6]. Движение поезда сопровождается знакопеременными воздушными волнами с зонами избыточного и разреженного давлений в уровне первого и последнего вагонов. Также волна с меньшими амплитудными значениями образуется в месте соединения двояженных поездов.

Из анализа распределения давлений вокруг движущегося высокоскоростного поезда следует, что аэродинамическое воздействие имеет сложный двухкомпонентный периодический характер, обусловленный знакопеременным импульсным воздействием воздушных волн и их периодическим характером (рис. 1).

Частота воздушной волны u_1 в голове и хвосте поезда определяется расстоянием l между ее амплитудными величинами, соответствующими полупериоду волны, частота которой может быть определена выражением

$$u_1 = \frac{v}{2l}, \quad (1)$$

где v – скорость поезда, м/с; l – расстояние между амплитудами воздушной волны, м.

Расстояние l является постоянным для каждого конкретного типа подвижного состава и чаще всего находится в диапазоне от 7–9 м [4, 5].

Периодический характер воздействия обусловлен фиксированным расстоянием генерируемых воздушных волн L , зависящим от длины подвижного состава. Частота волн u_2 определяется как

$$u_2 = \frac{u}{L}, \quad (2)$$

где L – длина поезда, м.

К наиболее подверженным аэродинамическому воздействию от движущихся поездов сооружениям относятся надземные пешеходные путепроводы, являющиеся неотъемлемой

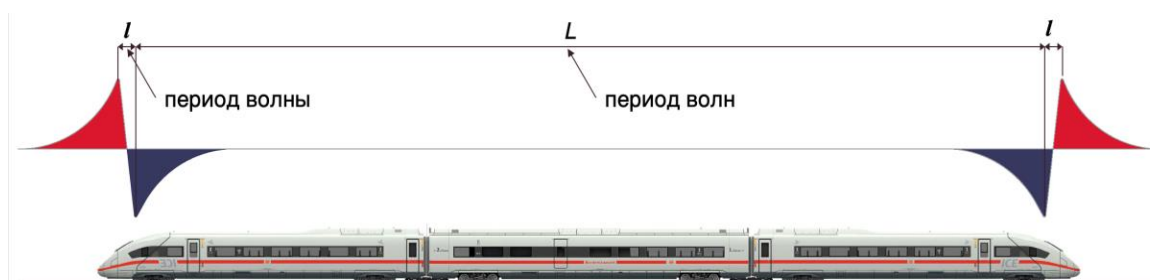


Рис. 1. Периоды воздушных волн и период между ними

составляющей вокзалов высокоскоростных железнодорожных магистралей. Данным конструкциям свойственно близкое расположение к движущемуся поезду и большая наветренная площадь (за счет остекления).

Как следует из исследований [6–9], аэродинамическое воздействие высокоскоростного поезда на пролетное строение пешеходного путепровода носит волновой знакопеременный и крайне быстро изменяющийся во времени характер. Вследствие этого в конструкциях может возникнуть существенная динамическая реакция, так как пролетные строения пешеходных путепроводов имеют относительно малую массу и жесткость [10].

В настоящей статье рассмотрены результаты экспериментальных и численных исследований динамической реакции пролетных строений пешеходных путепроводов над путями высокоскоростных железнодорожных магистралей.

Материалы и методы исследования

Исследования динамической реакции пешеходного путепровода на аэродинамическое

воздействие высокоскоростного поезда выполнялись как экспериментально, так и методами численного моделирования.

Экспериментальная оценка динамического отклика пролетного строения на аэродинамическое воздействие осуществлялась на пешеходном путепроводе линии Санкт-Петербург – Москва. Рассматриваемое пролетное строение – металлическое неразрезное, выполненное по схеме $2 \times 27,7$ м. По периметру поперечного сечения устроено остекление из поликарбоната.

Измерения динамической реакции конструкции выполнялись трехосевыми акселерометрами, установленными в середине пролетного строения. По результатам измерений были получены графики ускорений пролетного строения при проследовании под ним высокоскоростного поезда «Сапсан» со скоростью 220 км/ч (рис. 2).

По результатам измерений выявлена близость величин собственных частот конструкции (4,3 Гц) и частоты знакопеременной головной воздушной волны, создаваемой движущимся

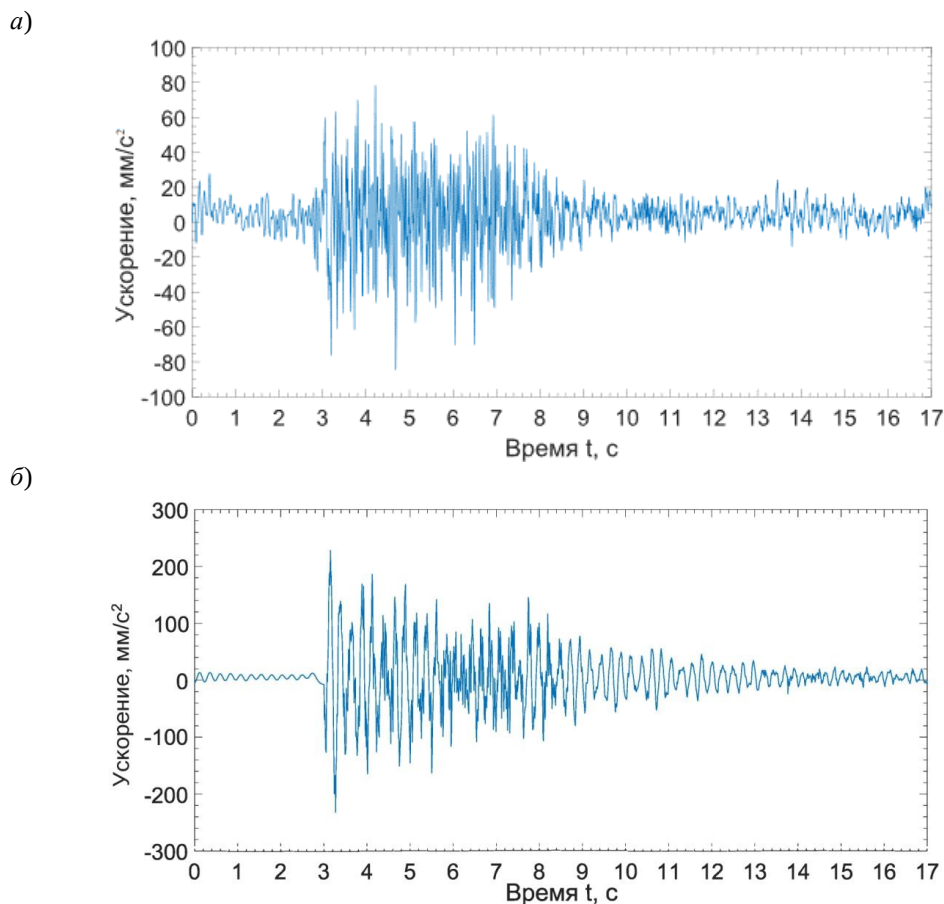


Рис. 2. Примеры полученных графиков ускорений пролетного строения:
а – горизонтальные ускорения; б – вертикальные ускорения

поездом (4,2 Гц). Близость частот вызывает в конструкции периодические колебания, затухающие только спустя некоторое время после проследования поезда. Следует отметить, что на воздействие откликается не какой-либо отдельный элемент, а конструкция целиком.

Результаты экспериментальной оценки подтверждают предположение о возможности существенной динамической реакции пролетного строения на аэродинамическое воздействие от движущегося поезда с возможностью возникновения резонансного или околорезонансного режимов. Незначительные величины ускорений конструкции, полученные при проведении измерений, обусловлены малой скоростью движения и, как следствие, небольшим энергетическим потенциалом воздушного потока, создаваемого поездом.

В численных исследованиях рассматривается конструкция проектируемого пролетного строения пешеходного путепровода на одной из промежуточных станций высокоскоростной магистрали ВСЖМ-1 Санкт-Петербург – Москва. Пролетное строение представлено пространственной металлической решетчатой фермой с устройством прохаживаемой части в уровне нижнего пояса (рис. 3). Масса конструкции составляет 76 т.

Численные исследования проводились в два этапа:

- 1) выполнялось определение аэродинамических нагрузок;
- 2) полученные нагрузки прикладывались к конструкции.

Определение аэродинамических нагрузок на конструкцию осуществлялось с применением ранее разработанной, верифицированной и апробированной при решении практических задач численной модели взаимодействия элементов системы движущийся поезд – воздушная среда – объект инфраструктуры (рис. 4) [11].

Задача рассматривалась в диапазоне физического времени от 6 с для одиночного до 10 с для двоярного поездов соответственно с шагом временной дискретизации 0,005 с. Число Куранта в процессе расчета не превышало пяти.

На первом этапе были получены графики изменения безразмерных аэродинамических

коэффициентов сил и давлений (рис. 5), действующих на конструкцию, для трех характерных компоновок высокоскоростных поездов: два поезда из 8 и 12 вагонов и двоярный поезд из 16 вагонов.

На следующем этапе для динамического расчета пролетного строения на воздействие аэродинамических нагрузок была разработана конечно-элементная стержневая модель конструкции и выполнен ее модальный анализ. Общий вид разработанной конечно-элементной модели и ряд форм колебаний, соответствующих первым частотам конструкции, представлен на рис. 6.

Динамические расчеты выполнялись в диапазоне скоростей от 100 до 420 км/ч. Результаты представлены графиками изменения величин динамических коэффициентов, ускорений и перемещений конструкции (рис. 7).

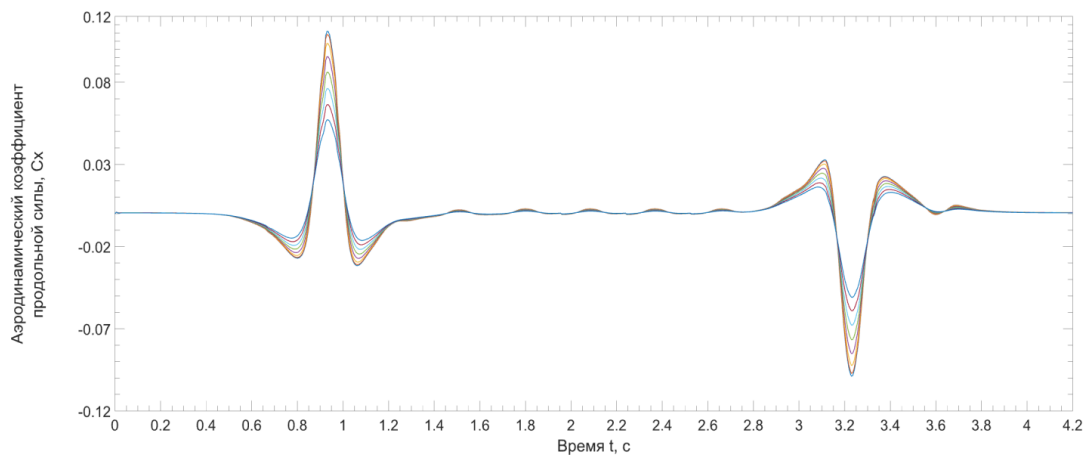
В результатах моделирования, представленных на графиках, явно прослеживаются две составляющие: равномерная, вызванная импульсным знакопеременным воздействием на конструкцию головной воздушной волны (первичное возбуждение) и периодическая, вызванная периодическим характером движения воздушных волн (вторичное возбуждение). Для подтверждения данного характера отклика конструкции отдельно было выполнено моделирование ограниченного воздействия на конструкцию только головной воздушной волны, результаты которого представлены на рис. 8.

Из представленных на рис. 8 графиков следует, что величина динамического коэффициента в конструкции, вызванная импульсным воздействием головной воздушной волны в зависимости от скорости поезда, имеет достаточно монотонный характер, без каких-либо всплесков как для вертикальной, так и для горизонтальной сил. Резкое увеличение динамических коэффициентов при скоростях порядка 250 и 280 км/ч связано с тем, что при данных скоростях частота воздействия головной воздушной волны становится близка к собственным частотам конструкции: 4,16 Гц (см. рис. 6, в) для горизонтальной и 5,56 Гц (см. рис. 6, г) для вертикальной форм соответственно.

A 3D perspective schematic of a microfluidic device. It consists of a long, narrow rectangular body with a central channel. The channel is divided into two main sections by a central vertical wall. Each section contains a smaller, rectangular chamber. The chambers are connected to the main channel via small openings. The entire device is shown in a perspective view, highlighting its elongated structure.

Рис. 4. Общий вид разработанной расчетной модели

а)



б)

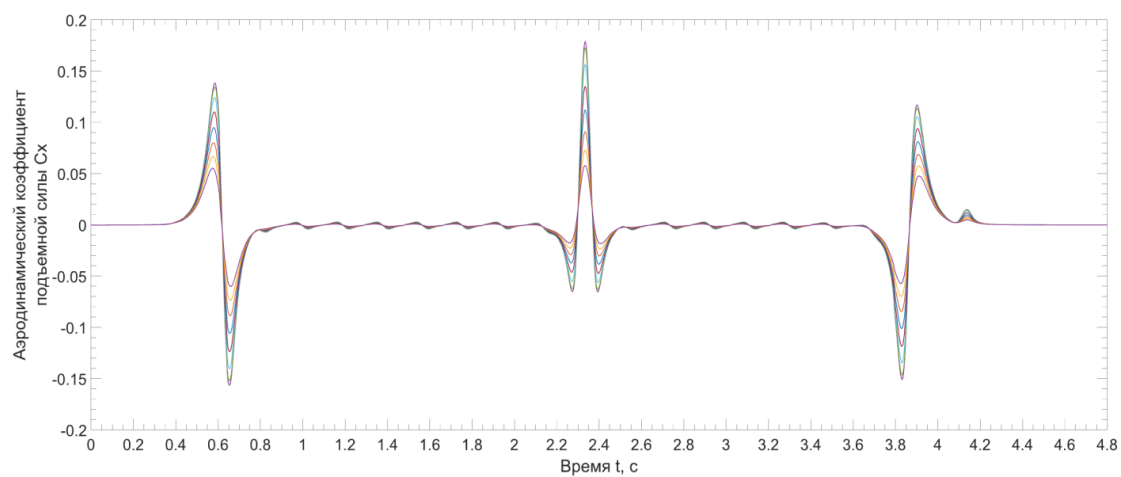
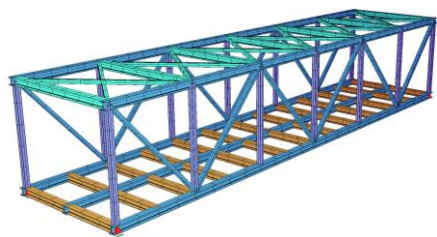
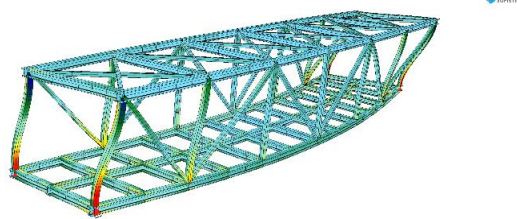


Рис. 5. График изменения аэродинамических коэффициентов подъемной силы:
а – одиночный поезд из 8 вагонов; б – двойной поезд из 16 вагонов

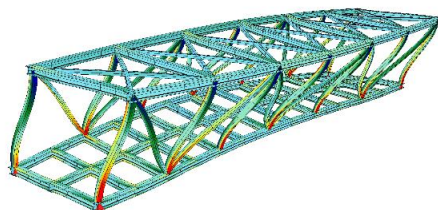
а)



б)



в)



г)

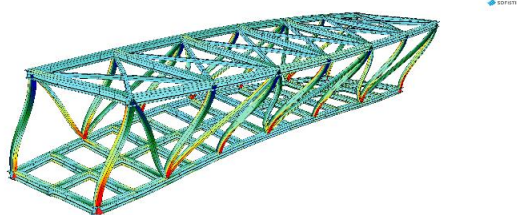


Рис. 6. Общий вид расчетной модели и формы колебаний конструкции:
а – общий вид модели; б – форма колебаний первой частоты (2,61 Гц);
в – вторая форма колебаний (4,16 Гц); г – третья форма колебаний (5,56 Гц)

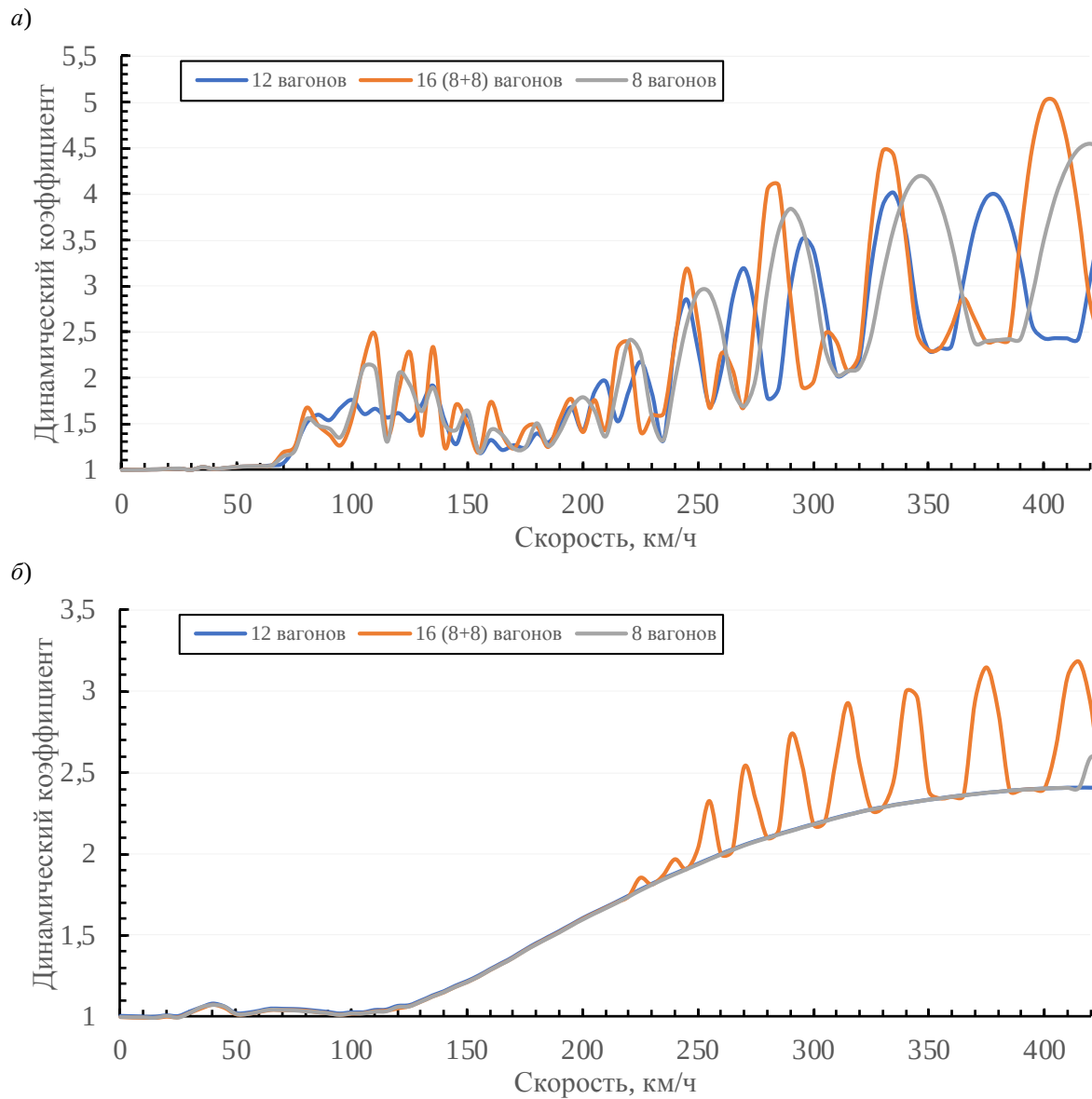


Рис. 7. График изменения динамических коэффициентов подъемной силы в зависимости от скорости поезда:
а – максимальные значения; б – минимальные значения

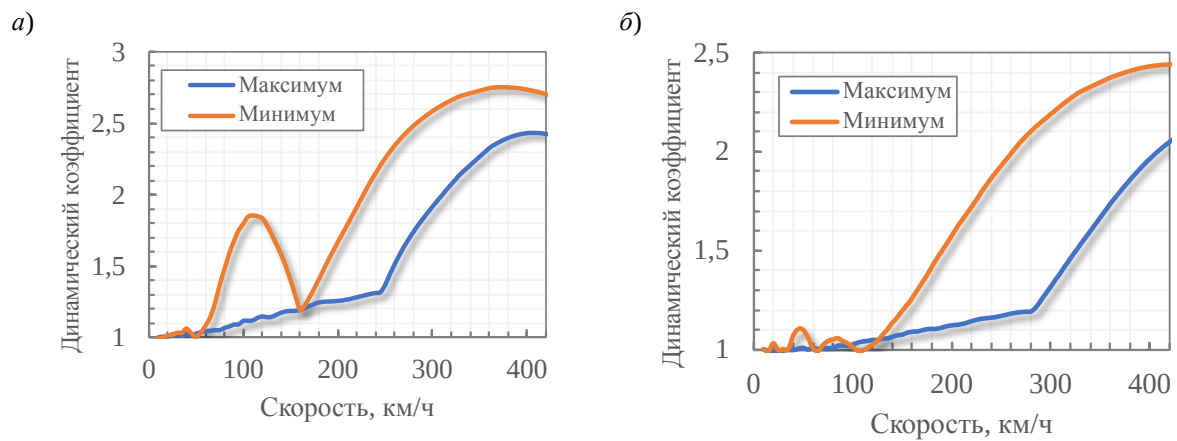


Рис. 8. График изменения динамических коэффициентов в зависимости от скорости поезда при воздействии только головной воздушной волны:
а – к продольной силе; б – к подъемной силе

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты выполненных расчетов свидетельствуют о том, что всплески величин динамических коэффициентов, представленных на рис. 7, вызваны совпадением какой-либо собственной частоты колебаний конструкции с частотой прохождения волн. Совпадение частот приводит к резкому увеличению амплитуды колебаний (рис. 9, *а*) и ускорений (рис. 10, *а*) в конструкции. В то же время их несовпадение приводит обратному эффекту, так как импульсы дальнейших волн будут гасить энергию колебаний пролетного строения и, как следствие, перемещения (см. рис. 9, *б*) и ускорения (см. рис. 10, *б*) конструкции.

Результаты выполненных расчетов конструкции представлены экстремальными величинами перемещений и ускорений в уровне проехной части рассматриваемого сооружения: 1 м/с^2 для вертикальных и $0,3 \text{ м/с}^2$ для горизонтальных ускорений. Однако сделать какой-либо вывод о допустимости данных значе-

ний не представляется возможным, так как предельные величины мгновенных ускорений для пролетных строений пешеходных мостов и путепроводов не нормируются в отечественной нормативной базе. Необходимо отметить, что условие динамической комфортности пребывания людей на сооружении является одним из важнейших свойств конструкции, определяющих возможность его эксплуатации исходя из психологических и физиологических критериев. Вышеуказанное обосновывает необходимость выполнения соответствующих исследований в области нормирования ускорений в уровне проехной части пешеходных мостов и путепроводов профильными организациями и институтами.

В зарубежной практике нормированию подвержены как вертикальные, так и горизонтальные ускорения с предельно допустимыми величинами $0,5$ и $0,2 \text{ м/с}^2$ соответственно [12, 13]. Так как существующая отечественная нормативная база имеет пробелы по рассмат-

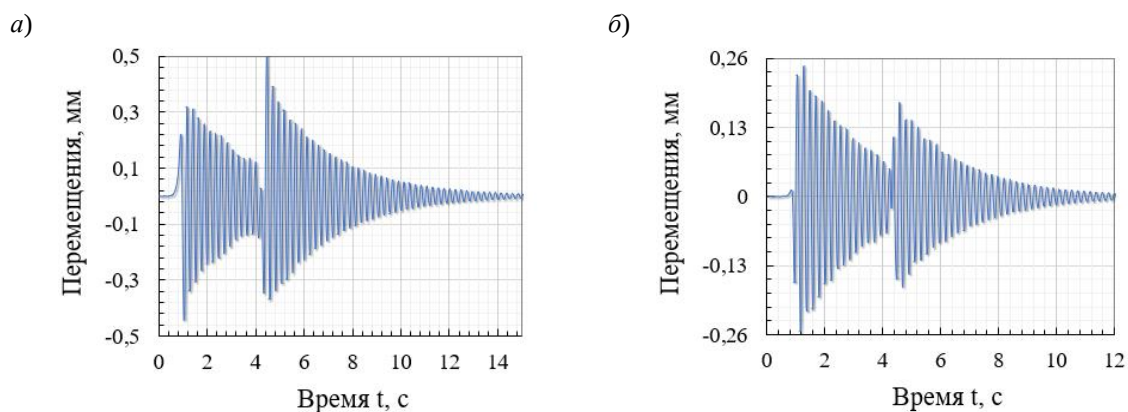


Рис. 9. Перемещения в середине пролетного строения при проследовании 12-вагонного поезда: *а* – горизонтальные при скорости 385 км/ч; *б* – вертикальные при скорости 340 км/ч

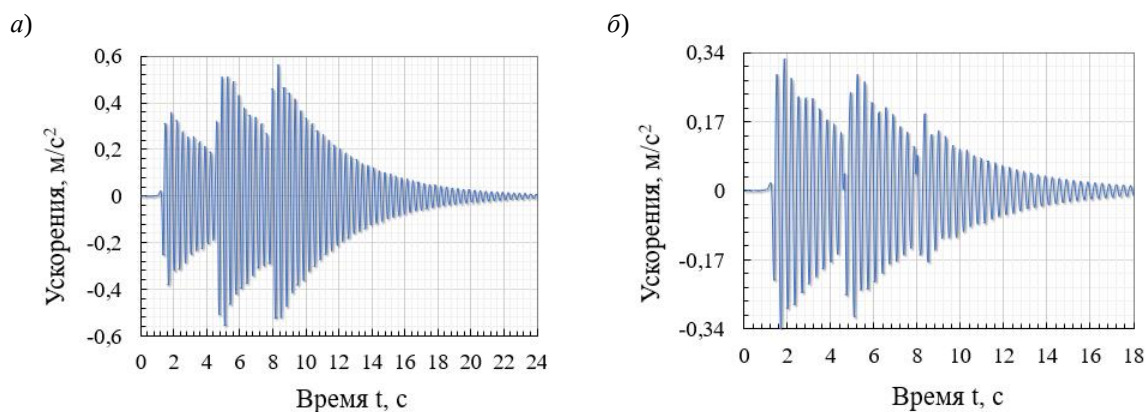


Рис. 10. Вертикальные ускорения в середине пролетного строения при проследовании 16-вагонного (8 + 8) поезда со скоростью: *а* – 385 км/ч; *б* – 370 км/ч

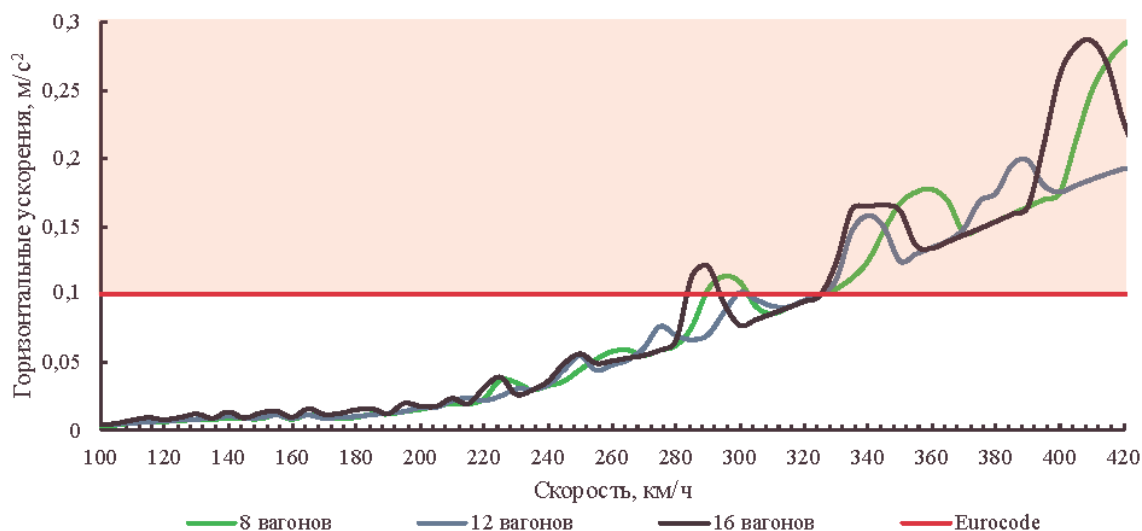


Рис. 11. Сопоставление наибольших величин горизонтальных ускорений с установленными предельно допустимыми величинами

риваемому вопросу, в качестве критериев допустимости были использованы вышеуказанные зарубежные нормативные величины.

При сопоставлении результатов расчета с принятыми допустимыми значениями (рис. 11) было выявлено превышение установленных величин горизонтальных ускорений при скоростях более 280 км/ч, что приводит к невозможности эксплуатации путепровода в составе ВСМ и требует пересмотра конструктивных решений пролетного строения в части повышения его горизонтальной жесткости.

Выводы

На основании результатов экспериментальных и численных исследований определен характер динамической реакции пролетного строения пешеходного путепровода над путями высокоскоростной железнодорожной магистрали на аэродинамическое воздействие движущегося высокоскоростного подвижного состава. Установлено наличие зависимости между величиной динамической реакции (перемещения и ускорения) конструкции от таких характеристик высокоскоростного поезда, как его длина и конфигурация (составность).

Выполнена оценка величины динамической реакции проектируемого путепровода в составе вокзального комплекса высокоскоростной магистрали Санкт-Петербург – Москва с последующим определением максимально допустимой скорости движения высокоскоростных поездов под сооружением из условий динамической комфортности. Предложенное по результатам численного моделирования проектное решение обеспечивает его безопасную эксплуатацию при скоростях до 280 км/ч, из чего был сделан вывод о необходимости пересмотра конструктивного решения с повышением его горизонтальной жесткости. Вместе с тем установлена недостаточность действующих отечественных нормативных документов в части предельно допустимых величин ускорений в уровне прогожей части пешеходных мостов и путепроводов. Предлагается выполнение соответствующих научно-исследовательских работ по совершенствованию нормативно-правовой базы профильными институтами и организациями. До выполнения исследований рекомендуется руководствоваться действующими зарубежными нормативными документами (в частности, нормами проектирования Eurocode).

Список источников

1. Смирнов В. Н., Дьяченко А. О., Дьяченко Л. К. Особенности проектирования мостов на высокоскоростных железнодорожных магистралях // Бюллетень результатов научных исследований. 2017. № 3. С. 69–81.
2. Лабутин Н. А., Дьяченко Л. К., Ланг А. В. Экспериментальные измерения аэродинамики подвижного состава // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 3 (62). С. 40–48.

3. Лазаренко Ю. М., Капуксин А. Н. Аэродинамическое воздействие высокоскоростного электропоезда «Сапсан» на пассажиров на платформах и на встречные поезда при скрещении // Вестник ВНИИЖТ. 2012. № 4. С. 11–14.
4. Baker C. J. A review of train aerodynamics. Part 1. Fundamentals // The Aeronautical Journal. 2014. Vol. 118. P. 201–228.
5. Baker C. J. A review of train aerodynamics. Part 2. Application // The Aeronautical Journal. 2014. Vol. 118. P. 345–382.
6. Full-scale experiment of transient aerodynamic pressures acting on a bridge noise barrier induced by the passage of high-speed trains operating at 380–420 km/h / Xiao-Hui Xiong, Bo Yang, Kai-Wen Wang [et al.] // Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics. 2020. Vol. 204. P. 1–9.
7. Лабутин Н. А. Исследование аэродинамического воздействия высокоскоростного поезда на пешеходные путепроводы // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 3 (66). С. 28–40.
8. Experimental and numerical studies on aerodynamic loads on an overhead bridge due to passage of high-speed train / Na Yang, Xiu-Kai Zheng, Jian Zhang [et al.] // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2015. Vol. 140. P. 19–33.
9. On the aerodynamic loads when a high-speed train passes under an overhead bridge / Xi-Feng Liang, Xiao-Bai Li, Guang Chen [et al.] // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2020. Vol. 202. P. 1–11.
10. Лапин А. В. Актуальные вопросы компоновки поперечных сечений пролетных строений пешеходных мостов // Ученые заметки ТОГУ. 2015. № 2. С. 6–18.
11. Лабутин Н. А. Разработка численной модели аэродинамического взаимодействия высокоскоростного поезда, воздушной среды и объектов инфраструктуры // Мир транспорта. 2022. № 4. С. 6–16.
12. Heinemeyer C., Butz C., Keil A. [et al.] Design of lightweight footbridges for human induced vibrations. EUR 23984 EN / ed. G. Sedlacek, C. Heinemeyer, C. Butz, M. Geradin. Luxembourg (Luxembourg) : European Commission, 2009. JRC53442.
13. EN 1990:2002. Eurocode: Basis of structural design / European committee for standardization. 2002.

References

1. Smirnov V. N., Diachenko L. K., Diachenko A. O. The peculiarities of constructing bridges at high-speed railway tracks. *Bulletin of Scientific Research Results*. 2017;(3):69–81. (In Russ.).
2. Labutin N.A. Investigation of the aerodynamic effect of a high-speed train on pedestrian overpasses. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(62):28–40. (In Russ.).
3. Lazarenko Yu. M., Kapustin A. N. Aerodynamic effect of the high-speed electric train Sapsan for passengers on platforms and on oncoming trains when crossing. *Bulletin of the Research Institute of Railway Transport*. 2012;(4):11–14. (In Russ.).
4. Baker C. J. A review of train aerodynamics. Part 1. Fundamentals. *The Aeronautical Journal*. 2014;118:201–228.
5. Baker C. J. A review of train aerodynamics. Part 2. Application. *The Aeronautical Journal*. 2014;118:345–382.
6. Xiong Xiao-Hui, Yang Bo, Wang Kai-Wen [et al.]. Full-scale experiment of transient aerodynamic pressures acting on a bridge noise barrier induced by the passage of high-speed trains operating at 380–420 km/h. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*. 2020;(204):1–9.
7. Labutin N. A. Research of the aerodynamic effect of a high-speed train on pedestrian overpasses. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(66):28–40. (In Russ.).
8. Yang Na, Zheng Xiu-Kai, Zhang Jian. Experimental and numerical studies on aerodynamic loads on an overhead bridge due to passage of high-speed train. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2015;140:19–33. (In Russ.).
9. Liang Xi-Feng, Li Xiao-Bai, Chen Guang. On the aerodynamic loads when a high-speed train passes under an overhead bridge. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2020;202:1–11.
10. Lapin A. V. Actual issues of cross-section layout of pedestrian bridge spans. *Scientific notes of Pacific National University*. 2015;(2):6–18. (In Russ.).
11. Labutin N. A. Development of a numerical model of the aerodynamic interaction of a high-speed train, the air environment and infrastructure facilities. *World of Transport and Transportation*. 2022;(4):6–16. (In Russ.).
12. Design of Lightweight Footbridges for Human Induced Vibrations: scientific report / European Committee for standardization. Luxemburg, 2009. 97 p.
13. European Standard EN 1990:2002: Eurocode – Basis of structural design. European committee for standardization, 2002.

Информация об авторах

Н. А. Лабутин – кандидат технических наук, инженер испытательной лаборатории «Мостовая лаборатория» кафедры «Мосты» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, главный инженер проектов ООО «Инженерное бюро искусственных сооружений».

А. В. Ланг – инженер испытательной лаборатории «Мостовая лаборатория» кафедры «Мосты» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, главный инженер проектов ООО «Инженерное бюро искусственных сооружений».

Т. В. Васютина – инженер ООО «Инженерное бюро искусственных сооружений».

Ю. П. Касаджик – ведущий инженер ООО «Инженерное бюро искусственных сооружений».

Information about the authors

N. A. Labutin – Candidate of Engineering, Engineer of the Bridge Testing Laboratory, Bridges Department, Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, Chief Project Engineer of Engineering Bureau of Artificial Structures, LLC.

A. V. Lang – Engineer of the Bridge Testing Laboratory, Bridges Department, Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, Chief Project Engineer of Engineering Bureau of Artificial Structures, LLC.

T. V. Vasutina – Engineer of Engineering Bureau of Artificial Structures, LLC.

Yu. P. Kasadzhik – Leading Engineer of Engineering Bureau of Artificial Structures, LLC.

Статья поступила в редакцию 03.07.2025; одобрена после рецензирования 24.09.2025; принята к публикации 30.09.2025.

The article was submitted 03.07.2025; approved after reviewing 24.09.2025; accepted for publication 30.09.2025.

Научная статья

УДК 624.131

doi:10.52170/1815-9265_2025_77_111

Определение начальной несущей способности двухслойных консолидирующихся оснований ленточных фундаментов

Александр Михайлович Караулов¹, Константин Валерьевич Королев^{2✉},
Максим Витальевич Шохирев³, Борис Дмитриевич Просяников⁴

^{1, 2, 4} Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

³ ООО «ПИИ БТП», Новосибирск, Россия

¹ karaulov_am@mail.ru

² korolev_kv@mail.ru✉

³ 170596maxim@gmail.com

⁴ feinstahl@mail.ru

Аннотация. Применение вычислительных программных комплексов является перспективным направлением в области проектирования фундаментной части зданий и сооружений. Конечно-элементное моделирование деформаций основания от проектной нагрузки позволяет учесть неоднородность грунтового массива, специфические свойства грунта и различные режимы нагружения. При этом проектировщики располагают также приближенными аналитическими методиками расчета, такими как метод послойного суммирования, включенными в нормативные документы. Комплексное использование результатов численных и аналитических расчетов позволяет принимать обоснованные решения.

Совершенно иная ситуация имеет место в области прогноза несущей способности грунтовых оснований. С использованием современных упругопластических моделей грунта в рамках метода конечных элементов устанавливается процесс развития зон пластического деформирования в основании при увеличении нагрузки. Однако результаты моделирования критической области разрушения основания отличаются неустойчивостью. И, главное, отсутствует критерий разрушения основания как по развитию области пластических деформаций, так и по характеру графика осадка – нагрузка. Более уверенные результаты дает метод предельного анализа. Однако, поскольку он появился не так давно, то требует длительной верификации. Поэтому совершенствование аналитических методов расчета несущей способности оснований является по-прежнему актуальной задачей на сегодняшний день. Теоретической базой определения разрушающей нагрузки служит статический метод теории предельного равновесия грунтов. К настоящему времени широкое применение нашли апробированные методы определения несущей способности однородных оснований в стабилизированном состоянии и рекомендации по учету нестабилизированного состояния. Следующий этап – это учет неоднородности основания. Для начального случая двухслойного основания в стабилизированном состоянии недавно был предложен специальный метод расчета несущей способности, основанный на комплексном использовании решений статики сыпучей среды и методе логарифмической спирали. Дальнейшее совершенствование заключается в учете нестабилизированного состояния, т. е. получении решения для двухслойного основания, сложенного консолидирующимися грунтами. Такое решение, которому и посвящена настоящая статья, можно получить с использованием теории мгновенной прочности и статического решения о несущей способности однородного консолидирующегося основания.

Ключевые слова: несущая способность, двуслойное основание, ленточный фундамент, метод логарифмической спирали

Для цитирования: Определение начальной несущей способности двухслойных консолидирующихся оснований ленточных фундаментов / А. М. Караулов, К. В. Королев, М. В. Шохирев, Б. Д. Просяников // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 5 (77). С. 111–117. DOI 10.52170/1815-9265_2025_77_111.

Original article

Determination of the initial bearing capacity of two-layer consolidating bases of strip foundations

Alexander M. Karaulov¹, Konstantin V. Korolev^{2✉}, Maxim V. Shokhirev³, Boris D. Prosyaniikov⁴

^{1, 2, 4} Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

³ ООО 'ПИИ БТП', Novosibirsk, Russia

¹ karaulov_am@mail.ru

² korolev_kv@mail.ru✉

³ 170596maxim@gmail.com

⁴ feinstahl@mail.ru

Abstract. The use of computational software packages is a promising area in the design of foundations for buildings and structures. Finite element modeling of foundation deformations under the design load allows for consideration of soil mass heterogeneity, specific soil properties, and various loading conditions. Designers also have access to approximate analytical calculation methods, such as the layer-by-layer summation method, included in regulatory documents. The integrated use of numerical and analytical calculation results enables informed decision-making.

A completely different situation exists in predicting the bearing capacity of soil foundations. Using modern elastic-plastic soil models within the finite element method, the development of plastic deformation zones in the foundation is determined with increasing load. However, the results of modeling the critical failure zone of the foundation are unstable. Most importantly, there is no criterion for foundation failure based on either the development of the plastic deformation zone or the nature of the load-settlement curve. The limit analysis method yields more reliable results. However, having only recently emerged, it requires extensive verification. Therefore, improving analytical methods for calculating the bearing capacity of foundations remains a pressing issue today. The theoretical basis for determining the failure load is the static method of the theory of limit equilibrium of soils. Currently, proven methods for determining the bearing capacity of homogeneous foundations in a stabilized state and recommendations for accounting for the unstabilized state have found widespread application. The next step is to account for the heterogeneity of the foundation. For the initial case of a two-layer foundation in a stabilized state, a special method for calculating the bearing capacity was recently proposed, based on the integrated use of bulk media statics solutions and the logarithmic spiral method. Further improvement involves accounting for the unstabilized state, i.e., obtaining a solution for a two-layer foundation composed of consolidating soils. Such a solution, which is the subject of this article, can be obtained using the theory of instantaneous strength and a static solution for the bearing capacity of a homogeneous consolidating foundation.

Keywords: load-bearing capacity, two-layer foundation, strip foundation, logarithmic spiral method

For citation: Karaulov A. M., Korolev K. V., Shokhirev M. V., Prosyankov B. D. Determination of the initial bearing capacity of two-layer consolidating bases of strip foundations. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(77):111–117. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_77_111.

Введение

Актуальной задачей совершенствования методов расчета грунтовых оснований является оценка несущей способности в случае их неоднородности. Это в полной мере относится к основаниям, сложенным консолидирующимися грунтами. Исходной расчетной схемой для этих задач является двухслойное основание. Для стабилизированного состояния (неконсолидирующихся грунтов) был предложен вариант расчета предельной нагрузки на двухслойное основание, основанный на использовании апробированных решений теории предельного равновесия для однородного основания и коэффициента влияния подстилающего слоя, определенного методом логарифмической спирали [1]. Для однородных консолидирующихся оснований статические решения теории предельного равновесия получены для частных случаев, одним из которых является определение начальной несущей способности [2]. В данной статье рассматривается возможность использования коэффициента влияния подстилающего слоя для оценки начальной несущей способности двухслойного консолидирующегося основания.

Начальной несущей способностью консолидирующегося основания является предельная нагрузка, вызывающая его разрушение при теоретически мгновенном приложении [2, 3]. Здесь предполагается отсутствие предварительного уплотнения основания. Оценка предельного

равновесия основания в нестабилизированном состоянии базируется на специальной теории мгновенной прочности консолидирующегося грунта, разработанной в рамках принципа эффективных напряжений [3–6]. Соответственно, предполагаются две системы напряжений: эффективные в скелете грунта и поровое давление в воде. Именно такой подход позволил получить каноническую систему дифференциальных уравнений предельного равновесия консолидирующегося грунта и осуществить целый ряд строгих решений статики сыпучей среды по определению предельного давления на основание [2, 3].

Теоретическое исследование

Итак, прочность консолидирующегося грунта определяется зависимостью Кулона – Мора с использованием специальных параметров мгновенной прочности грунта [2, 6]:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = (\sigma_1 + \sigma_3 + 2k \operatorname{ctg} \rho) \sin \rho, \quad (1)$$

где k и ρ – параметры мгновенной прочности консолидирующегося грунта: удельное сцепление и угол внутреннего трения.

Параметры мгновенной прочности даются выражениями [2]:

$$\sin \rho = (1 - \beta) \sin \varphi, \quad k = \frac{1}{\cos \rho} (\beta \sigma' + c \cos \varphi), \quad (2)$$

где c и φ – параметры прочности грунта (удельное сцепление и угол внутреннего трения), установленные в консолидировано-дре-

нированных испытаниях; σ' – эффективное среднее напряжение, действующее в момент приложения нагрузки.

Коэффициент порового давления β является специальной характеристикой консолидирующегося грунта, представляющей собой отношение возникающего в поровой воде давления к величине полного гидростатического давления в момент его приложения [3, 7]. Этот коэффициент устанавливается экспериментально.

Решение классической задачи о предельном давлении на неуплотненное консолидирующееся основание (начальная несущая способность) для условий плоской деформации в координатах zOx (поверхность основания $z = 0$) приведено в работах [2, 3]. С учетом пригрузки q , отражающей эффект заглубления фундамента, достигнутый уровень эффективного напряженного состояния составляет

$$\sigma' = \gamma_{sb} z + q. \quad (3)$$

Выражение для предельной нагрузки записывается в стандартной форме [2]:

$$p_u = \gamma_{sb} b N_{\gamma c} + q N_{qc} + c N_{cc}, \quad (4)$$

где b – ширина штампа (ленточного фундамента); $N_{\gamma c}$, N_{qc} , N_{cc} – коэффициенты начальной несущей способности водонасыщенного основания.

Очевидно, что при $\beta = 0$ имеем стабилизированное состояние и коэффициенты несущей способности определяются формулами

$$\begin{aligned} N_{\gamma c} = N_{\gamma 0} &= \frac{3 \sin \varphi \operatorname{ctg} \mu}{4(1 + 8 \sin^2 \varphi)} \times \\ &\times \left[(1 + 2 \sin \varphi) \operatorname{ctg} \mu \cdot e^{\frac{3}{2} \pi \operatorname{tg} \varphi} + 1 - 2 \sin \varphi \right]; \\ N_{qc} = N_{q0} &= \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} e^{\pi \operatorname{tg} \varphi}; \\ N_{cc} = N_{c0} &= \operatorname{ctg} \varphi (N_{q0} - 1). \end{aligned} \quad (5)$$

Для случая $\beta = 1$ эти коэффициенты можно вычислить по аппроксимационным зависимостям для диапазона $5^\circ \leq \varphi \leq 30^\circ$:

$$\begin{aligned} N_{\gamma c} = N_{\gamma 1} &= 0,1657 + 1,725(\varphi - 0,08727); \\ N_{qc} = N_{q1} &= 1,4485 + 4,867(\varphi - 0,08727); \\ N_{cc} = N_{c1} &= \operatorname{ctg} \varphi (N_{q1} - 1). \end{aligned} \quad (6)$$

Аппроксимационные зависимости предлагаются также и для промежуточных значений $0 < \beta < 1$:

$$N_{\gamma c} = N_{\gamma 0} \left(\frac{N_{\gamma 1}}{N_{\gamma 0}} \right)^\beta, \quad N_{qc} = N_{q0} \left(\frac{N_{q1}}{N_{q0}} \right)^\beta. \quad (7)$$

Приведенные выражения позволяют устанавливать начальное предельное давление на однородное консолидирующееся основание.

Для двухслойного основания строгое решение теории предельного равновесия грунтов не существует не только для консолидирующихся грунтов, но и для оснований в стабилизированном состоянии. В этой связи оценку несущей способности двухслойных оснований было предложено выполнять с использованием коэффициента влияния подстилающего слоя, который зависит от глубины залегания его кровли l [4]. Влияние подстилающего слоя имеет место до некоторого критического значения: $l = l_{кр}$. При $l = 0$ предельная нагрузка определяется только прочностью подстилающего слоя p_{u2} . Для $l \geq l_{кр}$ предельная нагрузка определится параметрами несущего слоя p_{u1} . Промежуточным значениям $0 < l < l_{кр}$ отвечает несущая способность, равная

$$p_u = p_{u2} + k_l (p_{u1} - p_{u2}), \quad (8)$$

где k_l – коэффициент влияния.

Величина коэффициента влияния составляет

$$k_l = \frac{p_u - p_{u2}}{p_{u1} - p_{u2}}. \quad (9)$$

Здесь p_{u1} и p_{u2} определяются методами теории предельного равновесия грунтов. Поскольку предельное давление p_u установить в рамках этой теории не представляется возможным, то для определения коэффициента влияния подстилающего слоя используется метод логарифмической спирали [8–10].

Для использования указанного метода следует построить расчетную схему разрушения основания по линии скольжения, состоящей из отрезков логарифмических спиралей, исходящих из одного центра. Для консолидирующихся грунтов это представляется возможным, поскольку мгновенный угол внутреннего трения, тангенс которого есть параметр логарифмической линии, является постоянной величиной для определенного грунта [4]. На рисунке приведена расчетная схема для оценки устойчивости двухслойного консолидирующегося основания.

Момент M_γ , обусловленный действием собственного веса грунта, определяется выражениями

$$\begin{aligned}
 M_\gamma = & \int_{\theta_1}^{\theta_2} \gamma_{sb1} (r \cos \theta - r_1 \cos \theta_1) \frac{r^2 \sin \theta \cos(\theta - \rho_1)}{\cos \rho_1} d\theta + \\
 & + \int_{\theta_2}^{\theta_3} \gamma_{sb2} (r \cos \theta - r_2 \cos \theta_2) \frac{r^2 \sin \theta \cos(\theta - \rho_2)}{\cos \rho_2} d\theta + \\
 & + \int_{\theta_3}^{\theta_4} \gamma_{sb1} (r \cos \theta - r_1 \cos \theta_1) \frac{r^2 \sin \theta \cos(\theta - \rho_1)}{\cos \rho_1} d\theta + \\
 & + \frac{\gamma_{sb1} l}{2} (r_3^2 \sin^2 \theta_3 - r_2^2 \sin^2 \theta_2) = \\
 & = \frac{\gamma_{sb1} r_1^3}{4} \left[a_1^3 \cdot F_1(\theta_2, \rho_1) - F_1(\theta_1, \rho_1) + \right. \\
 & \quad \left. + 2 \cos \theta_1 (\sin^2 \theta_1 - a_1^2 \cdot \sin^2 \theta_2) \right] + \\
 & + \frac{\gamma_{sb2} r_2^3}{4} \left[a_2^3 \cdot F_1(\theta_3, \rho_2) - F_1(\theta_2, \rho_2) + \right. \\
 & \quad \left. + 2 \cos \theta_2 (\sin^2 \theta_2 - a_2^2 \cdot \sin^2 \theta_3) \right] + \\
 & + \frac{\gamma_{sb1} r_1^3}{4} \left[a_3^3 \cdot F_1(\theta_4, \rho_1) - F_1(\theta_3, \rho_1) + \right. \\
 & \quad \left. + 2 \cos \theta_1 \frac{r_1}{r_3} (\sin^2 \theta_3 - a_3^2 \cdot \sin^2 \theta_4) \right] + \\
 & + \frac{\gamma_{sb1} l}{2} (r_3^2 \sin^2 \theta_3 - r_2^2 \sin^2 \theta_2), \quad (14)
 \end{aligned}$$

$$\text{где } F_1(\theta_i, \rho_j) = \frac{\cos \theta_i - 2 \cos(2\rho_j + \theta_i)}{1 + 8 \sin^2 \rho_j} - \frac{\cos 3\theta_i}{3}.$$

Момент, обусловленный удельным сцеплением грунта, составляет

$$\begin{aligned}
 M_k = & \int_{\theta_1}^{\theta_2} k_1 r_1^2 E_1^2 d\theta + \int_{\theta_2}^{\theta_3} k_2 r_2^2 E_2^2 d\theta + \int_{\theta_3}^{\theta_4} k_1 r_3^2 E_3^2 d\theta = \\
 & = r_1^3 \left[a_1^3 F_2(\rho_1, \theta_2) - F_2(\rho_1, \theta_1) \right] n_1 + \\
 & + (a_1^2 - 1) \frac{r_1^2}{2 \operatorname{tg} \rho_1} (m_1 - n_1 r_1 \cos \theta_1) + \\
 & + r_2^3 \left[a_2^3 F_2(\rho_2, \theta_3) - F_2(\rho_2, \theta_2) \right] n_2 + \\
 & + (a_2^2 - 1) \frac{r_2^2}{2 \operatorname{tg} \rho_2} (m_2 - n_2 r_2 \cos \theta_2) +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + r_3^3 \left[a_3^3 F_2(\rho_1, \theta_4) - F_2(\rho_1, \theta_3) \right] n_1 + \\
 & + (a_3^2 - 1) \frac{r_3^2}{2 \operatorname{tg} \rho_1} (m_1 - n_1 r_1 \cos \theta_1), \quad (15)
 \end{aligned}$$

$$\text{где } F_2(\rho_i, \theta_j) = \frac{3 \operatorname{tg} \rho_i \cos \theta_j + \sin \theta_j}{1 + 9 \operatorname{tg}^2 \rho_i}.$$

И наконец, момент от пригрузки равен:

$$M_q = \frac{q}{2} \left[r_4^2 \sin^2 \theta_4 - (r_1 \sin \theta_1 + b)^2 \right]. \quad (16)$$

Предельная сила давления на консолидирующееся основание P_{ul} , определенная методом логарифмической спирали, будет равна минимуму функции P по параметрам r_1, θ_1 :

$$P_{ul} = \min P(r_1, \theta_1). \quad (17)$$

Величина P_{ul} рассчитывается для заданного значения l , и, кроме того, для $l = 0$ определяется предельная сила давления на однородное основание P_{ul2} , сложенное грунтом 2, и для $l > l_{кр}$ значение P_{ul1} для грунта 1. Все эти величины: P_{ul} , P_{ul1} и P_{ul2} — определяются методом логарифмической спирали. По этим значениям устанавливается коэффициент влияния:

$$k_l = \frac{P_{ul} - P_{ul2}}{P_{ul1} - P_{ul2}}. \quad (18)$$

Далее по формуле (8) рассчитывается искомая несущая способность двухслойного консолидирующегося основания p_u .

Результаты исследования

Пример расчета. Основание представлено двумя слоями полностью водонасыщенных глинистых грунтов. Первый слой (несущий) имеет характеристики: $\gamma_{sb1} = 11$ кН/м³; $c_1 = 15$ кПа; $\varphi_1 = 26^\circ$; $\beta_1 = 0,52$.

Второй слой (подстилающий) характеризуется параметрами: $\gamma_{sb2} = 10,4$ кН/м³; $c_2 = 21$ кПа; $\varphi_2 = 18^\circ$; $\beta_2 = 0,83$.

Ширина штампа (ленточного фундамента) равна $b = 2$ м, глубина положения кровли подстилающего слоя $l = 1,5$ м, боковая пригрузка $q = 20$ кПа.

Значения коэффициентов несущей способности $N_{\gamma 0}$, $N_{q 0}$, $N_{c 0}$, $N_{\gamma 1}$, $N_{q 1}$, $N_{c 1}$, $N_{\gamma c}$, N_{qc} , N_{cc} ,

Таблица 1

Значения коэффициентов несущей способности

Грунт	$N_{\gamma 0}$	$N_{q 0}$	$N_{c 0}$	$N_{\gamma 1}$	$N_{q 1}$	$N_{c 1}$	$N_{\gamma c}$	N_{qc}	N_{cc}
Слой 1	6,23	4,63	7,44	0,798	3,23	4,58	2,14	3,84	5,82
Слой 2	1,93	2,78	5,46	0,557	2,55	4,78	0,688	2,59	4,89

Таблица 2

Значения параметров ρ , n и m

Грунт	ρ	n	m
Слой 1	12,15°	2,56	18,4
Слой 2	3,01°	2,67	27,6

вычисленные по формулам (5)–(7) для слоев 1 и 2, приведены в табл. 1.

Начальная несущая способность однородного консолидирующегося основания, определенная по теории предельного равновесия консолидирующихся грунтов, будет равна:

• для основания, сложенного первым грунтом:

$$p_u = p_{u1} = 11 \cdot 2 \cdot 2,14 + 15 \cdot 3,84 + 20 \cdot 5,82 = 211 \text{ кПа};$$

• для основания, сложенного вторым грунтом:

$$p_u = p_{u2} = 10,4 \cdot 2 \cdot 0,688 + 21 \cdot 2,59 + 20 \cdot 4,89 = 168 \text{ кПа}.$$

Для расчета несущей способности двухслойного основания с расположенным на глубине l подстилающим слоем по формулам рассчитываются параметры, позволяющие установить характеристики мгновенной прочности k и ρ для консолидирующихся грунтов 1 и 2. Эти данные приведены в табл. 2.

Равнодействующие предельной нагрузки на однородные консолидирующиеся основания, определенные по формулам (13)–(17), составили для первого грунта $P_{u1} = 484$ кН и для второго грунта $P_{u2} = 362$ кН. Для рассматриваемого случая $l = 1,5$ м предельная нагрузка равна $P_u = 402$ кН. Коэффициент влияния подстилающего слоя составляет

$$k_l = \frac{402 - 362}{484 - 362} = 0,328.$$

Несущая способность двухслойного консолидирующегося основания, согласно (8), характеризуется величиной

$$p_u = 168 + 0,328 \cdot (211 - 168) = 182 \text{ кПа}.$$

Выводы

Изложенная методика определения начальной несущей способности двухслойного консолидирующегося основания может быть использована в практическом проектировании фундаментов на водонасыщенных глинистых грунтах.

Список источников

1. Караулов А. М., Королев К. В., Шохирев М. В. Оценка несущей способности двухслойных грунтовых оснований // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2020. № 11 (743). С. 18–27.
2. Королев К. В. Несущая способность оснований в стабилизированном и нестабилизированном состоянии. Москва : УМЦ ЖДТ, 2017. 279 с.
3. Королев К. В., Караулов А. М. Механика грунтов. Т. 1, 2. Москва : УМЦ ЖДТ, 2022. 400 с.
4. Терцаги К. Теория механики грунтов. Москва : Госстройиздат, 1961. 507 с.
5. Флорин В. А. Основы механики грунтов. Т. 1, 2. Москва ; Ленинград : Госстройиздат, 1961. 544 с.
6. Соловьев Ю. И., Смолин Ю. П. Мгновенная прочность консолидирующихся грунтов // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1976. № 9. С. 41–48.
7. Соловьев Ю. И. Жестко- и упругопластический анализ устойчивости и напряженно-деформированного состояния грунтов : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва, 1989. 42 с.
8. Хуан Я. Х. Устойчивость земляных откосов. Москва : Стройиздат, 1988. 240 с.
9. Костэ Ж., Санглера Г. Механика грунтов. Москва : Стройиздат, 1981. 456 с.
10. Шохирев М. В., Караулов А. М., Королев К. В. Расчет несущей способности двухслойного грунтового основания для наклонной нагрузки // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2023. № 6. С. 2–6.

References

1. Karaulov A. M., Korolev K. V., Shohirev M. V. Assessment of the bearing capacity of two-layer soil bases. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2020;(743):18–27. (In Russ.).
2. Korolev K. V. Bearing capacity of bases in a stabilized and unstabilized state. Moscow: Federal state budget establishment additional professional education 'Educational and instructional center for railway transportation'; 2017. 279 p. (In Russ.).
3. Korolev K. V., Karaulov A. M. Mechanics of soils. Vol. 1, 2. Moscow: Federal state budget establishment additional professional education 'Educational and instructional center for railway transportation'; 2022. (In Russ.).
4. Tertsagi K. Theory of soil mechanics. Moscow: Gosstroizdat; 1961. (In Russ.).
5. Florin V. A. Fundamentals of soil mechanics. Vol. 1, 2. Moscow: Gosstroyizdat; 1961. (In Russ.).
6. Solovyov Yu. I., Smolin Yu. P. Instant strength of consolidating soils. *News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture*. 1976;(9):41–48. (In Russ.).
7. Solovyov Yu. I. Rigid and elastoplastic analysis of stability and stress-strain state of soils: Abstract. Dissertation for the Degree of Doctor of Engineering. Moscow; 1989. 42 p. (In Russ.).
8. Huang Ya. K. Stability of earthen slopes. Moscow: Stroyizdat; 1988. 240 p. (In Russ.).
9. Koste J., Sanglera G. Mechanics of soils. Moscow: Stroyizdat; 1981. 456 p. (In Russ.).
10. Shohirev M. V., Karaulov A. M., Korolev K. V. Calculation of the bearing capacity of a two-layer soil base for inclined loading. *Foundations, Foundations and Soil Mechanics*. 2023;(6):2–6. (In Russ.).

Информация об авторах

А. М. Караулов – доктор технических наук, профессор кафедры «Геотехника, тоннели и метрополитены» Сибирского государственного университета путей сообщения.

К. В. Королёв – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Геотехника, тоннели и метрополитены» Сибирского государственного университета путей сообщения.

М. В. Шохирев – кандидат технических наук, инженер-проектировщик 1 категории ООО «ПИИ БТП».

Б. Д. Просяников – старший преподаватель кафедры «Здания, строительные конструкции и материалы» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

A. M. Karaulov – Doctor of Engineering, Professor of the Geotechnics, Tunnels and Subways Department, Siberian Transport University.

K. V. Korolev – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Geotechnics, Tunnels and Subways Department, Siberian Transport University.

M. V. Shokhirev – Candidate of Engineering, Design engineer 1 category ООО 'PII BTP'.

B. D. Prosyankov – Senior Lecturer of the Buildings, Construction Structures and Materials Department, Siberian Transport University

Статья поступила в редакцию 17.11.2025; одобрена после рецензирования 19.11.2025; принята к публикации 01.12.2025.

The article was submitted 17.11.2025; approved after reviewing 19.11.2025; accepted for publication 01.12.2025.

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: vestniksgups@sibgups.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



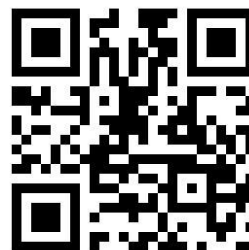
vestniksgups@sibgups.ru



+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*
Редактор *Е. Е. Рыжкова*
Корректор *А. А. Игумнов*
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: vestniksgups@sibgups.ru

Адрес издателя
630049, Россия, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191.
Телефон/факс: (383) 328-03-81.
E-mail: bvu@stu.ru

Подписано в печать 19.12.2025. Дата выхода в свет 22.12.2025
Тираж 350 экз. Формат 60×84/8
Объем 14,0 уч.-изд. л., 15,0 усл.-печ. л. Заказ № 4055

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
2025. № 6 (77). 1–119