

ISSN 1815-9265

ВЕСТНИК

Сибирского государственного
университета путей сообщения

№ 3 (75). 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

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

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

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

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

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

Редактор перевода текста на английский язык

Степачкова Ирина Игоревна – старший преподаватель

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. Ilinskyh, 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. Shwartsfeld, 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. 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

**Вестник
Сибирского государственного
университета путей сообщения**

Научно-теоретический
журнал

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»

№ 3 (75) · 2025 · ИЮЛЬ -СЕНТЯБРЬ · 16+

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

СОДЕРЖАНИЕ

Транспорт

Попова Н. Б., Марийченко К. С., Меркулов И. М. Железнодорожные грузовые перевозки как фактор устойчивого развития Сибирского региона: анализ и оценка.....	5
Калиниченко Е. А. Подход к подбору средств и методов защиты от шума вагонных замедлителей	14
Холодняк П. С., Пчелинцева Е. В. Влияние кривых малого радиуса на эксплуатационные показатели работы железнодорожного участка	23
Раззуваев Д. А., Аштиз Е. С., Нагаев Е. И. Результаты масштабного моделирования морозного пучения грунтов при термостабилизации сезонно-действующими охлаждающими устройствами	32
Беков М. А. Применение метрик центральности для поиска критических узлов и оценки их влияния на транспортную сеть	42
Фрибус А. А., Карасев С. В. Комплексный расчет занятости стрелочных горловин при работе с поездами нестандартной длины.....	53
Меркурьев Ю. С., Колос А. Ф. Обоснование выбора модели грунта для исследования стабильности земляного полотна железной дороги при сейсмическом воздействии	66

Строительство и архитектура

Ланис А. Л., Усов Д. А., Тархов В. А. К вопросу обоснования увеличения срока эксплуатации рельсов в метрополитене.....	78
Ардышиев И. К., Величко Д. В. К вопросу усиления конструкции бесстыкового пути при наличии фактора торможения поездов	88
Попов А. М., Зиновьев В. Б., Герасимов С. И., Тихомиров В. М. Применение метода теневого муара для исследования рельефа пластин	97
Шелехов И. Ю., Алтухов И. В., Дугаржапова И. Ж., Батурина А. А., Очиров В. Д. Ремонт фасадов зданий при неблагоприятных климатических условиях с использованием инфракрасных нагревателей	104

The Siberian Transport University Bulletin

A scientific journal

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"

Nº 3 (75) · 2025 · July - September · 16+

Issued quarterly. Established in 1999

CONTENTS

Transport

<i>N. B. Popova, K. S. Mariychenko, I. M. Merkulov.</i> Rail freight transportation as a factor in sustainable development of the Siberian region: analysis and assessment	5
<i>E. A. Kalinichenko.</i> Approach to the selection of means and methods of protection against the noise of wagon retarders.....	14
<i>P. S. Kholodnyak, E. V. Pchelintseva.</i> The effect of small radius curves on the operational performance of a railway section	23
<i>D. A. Razuvayev, E. S. Ashpiz, E. I. Nagaev.</i> Results of large-scale modeling of frost heaving in soils during thermostabilization with seasonally-operating cooling devices	32
<i>M. A. Bekov.</i> Application of centrality metrics for finding critical nodes and assessing their impact on the transport network	42
<i>A. A. Fribus, S. V. Karasev.</i> Comprehensive calculation of switching zone occupancy in operations with non-standard length trains	53
<i>Yu. S. Merkuryev, A. F. Kolos.</i> Rationale for the choice of a soil model for studying the stability of railway subgrade under seismic impact	66

Building and Architecture

<i>A. L. Lanis, D. A. Usov, V. A. Tarkhov.</i> To the question of justification of increasing the exploitation life of rails in the metro.....	78
<i>I. K. Ardyshev, D. V. Velichko.</i> To the question of strengthening the structure of a continuously welded rail track in the presence of a braking factor	88
<i>A. M. Popov, V. B. Zinoviev, S. I. Gerasimov, V. M. Tikhomirov.</i> Application of the shadow moire method to studi the relief of plates.....	97
<i>I. Yu. Shelekhov, I. V. Altukhov, I. Zh. Dugarzhapova, A. A. Baturin, V. D. Ochirov.</i> Repair of building facades in adverse climatic conditions using infrared heaters.....	104

ТРАНСПОРТ

Научная статья

УДК 656.225

doi:10.52170/1815-9265_2025_75_5

Железнодорожные грузовые перевозки как фактор устойчивого развития Сибирского региона: анализ и оценка

Наталья Борисовна Попова^{1✉}, Кирилл Сергеевич Марийченко²,
Иван Михайлович Меркулов³

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

¹pnb1512@yandex.ru[✉]

²mariichenko.k@yandex.ru

³merkul.223@mail.ru

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена тем, что в настоящее время работа железных дорог продолжает играть ключевую роль в экономике страны, особенно восточных регионов России. По-средством железных дорог осуществляется перемещение различных групп грузов, в особенности тех, что формируются в результате деятельности добывающих отраслей и производств, специализированных в том числе и для Сибирского региона. Целью исследования явилось описание территориальных, демографических, транспортных показателей субъектов, местоположение которых определяется границами Сибирского федерального округа, а прямое влияние на их рост, хозяйственное развитие и региональную интеграцию оказывают железные дороги – Западно-Сибирская, Красноярская, Восточно-Сибирская. Объектом исследования стали грузовые железнодорожные перевозки и «грузоформирующие» предприятия исследуемого региона. Предмет исследования – анализ современного уровня хозяйственного развития региона и его оценка с позиций устойчивости и перспектив дальнейшего развития грузопотока в части погрузки продукции добывающих, сельскохозяйственных и лесозаготовительных предприятий.

Анализ показал, что в целом вклад Сибирского региона в валовой региональный продукт страны составляет 9,3 %. При этом вклад производств добывающего комплекса, формирующего основную погрузку, – около 14,0 %. В совокупности с зерновыми и лесными грузами общая доля в погрузке составляет 24,0 %. Расчеты показали, что с позиций устойчивого развития именно эти производства, определяющие совокупную грузовую массу в железнодорожных перевозках, способны влиять на перспективы региональной грузовой работы по сети дорог Сибирского региона и определять их. Другим «грузоформирующими» производствам – группам обрабатывающих производств, строительству, торговле и прочим – в границах региона еще во многом предстоит расширить номенклатурный перечень своей продукции, сферу ее назначения и применения, способствуя тем самым, устойчивому хозяйственному развитию. То есть создать достаточную грузовую массу, чтобы расширить спектр перевозимых групп грузов, формируя условия для обеспечения устойчивого развития.

Ключевые слова: железнодорожные грузовые перевозки; устойчивость хозяйственного развития; Сибирский регион; валовой региональный продукт; погрузка; угольные, нефтяные, рудные, лесные, зерновые грузы; коэффициент специализации

Для цитирования: Попова Н. Б., Марийченко К. С., Меркулов И. М. Железнодорожные грузовые перевозки как фактор устойчивого развития Сибирского региона: анализ и оценка // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 3 (75). С. 5–13. DOI 10.52170/1815-9265_2025_75_5.

TRANSPORT

Original article

Rail freight transportation as a factor in sustainable development of the Siberian region: analysis and assessment

Natalya B. Popova^{1✉}, Kirill S. Mariychenko², Ivan M. Merkulov³

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

¹pnb1512@yandex.ru[✉]

²mariichenko.k@yandex.ru

³merkul.223@mail.ru

Abstract. The relevance of the study is due to the fact that at present the work of railways continues to play a key role in the economy of the country, especially the eastern regions of Russia. By means of railways, various groups of goods are moved, especially those that are formed as a result of the activities of extractive industries and

industries, specialized, among other things, for the Siberian region. The purpose of the study was to describe the territorial, demographic, transport indicators of the subjects, the location of which is determined by the boundaries of the Siberian Federal District, and the railways – West Siberian, Krasnoyarsk, East Siberian – have a direct impact on their growth, economic development and regional integration. The object of the study was freight rail transportation and ‘cargo-forming’ enterprises of the region under study. The subject of the study is the analysis of the current level of economic development of the region and its assessment from the standpoint of sustainability and prospects for further development of freight traffic in terms of loading products of mining, agricultural and logging enterprises.

The analysis showed that the overall contribution of the Siberian region to the gross regional product of the country is 9.3 %. At the same time, the contribution of the mining complex, which forms the main loading, is about 14.0 %. Together with grain and timber cargo, the total share in loading is 24.0 %. Calculations have shown that from the standpoint of sustainable development, it is these industries, which determine the total freight mass in rail transportation, that are able to influence and determine the prospects for regional freight work on the road network of the Siberian region. Other ‘freight-forming’ industries – groups of manufacturing industries, construction, trade, etc. – within the region still have much to do to expand the range of their products, the scope of their purpose and application, thereby contributing to sustainable economic development. That is, in the context of regional loading, to create a sufficient freight mass to expand the range of transported groups of goods, creating conditions for ensuring sustainable development.

Keywords: rail freight transportation; sustainability of economic development; Siberian region; gross regional product; loading; coal, oil, ore, timber, grain cargo; specialization coefficient

For citation: Popova N. B., Mariychenko K. S., Merkulov I. M. Rail freight transportation as a factor in sustainable development of the Siberian region: analysis and assessment. *The Siberian Transport University Bulletin.* 2025;(75):5–13. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_74_5.

Введение

Вопросы устойчивого развития (УР) изучались и продолжают рассматриваться многоаспектно. С общетеоретических и территориальных позиций имеются значимые разработки по данному вопросу, обобщенные, например, в коллективных монографиях [1–4]. Немало и интересно исследуется этот вопрос в ряде статей, посвященных многоуровневости УР [5], в том числе для городской среды [6, 7]. Одним из основных аспектов УР, анализируемых в работах многих авторов, являются социально-экономические характеристики [8, 9]. В последние годы большое внимание уделяется экономико-математическим методам исследования и иным подходам к оценке УР [10–12].

В трудах сибирских ученых [13–16] многоаспектным вопросам устойчивого развития отведено особое место. В них Сибирь рассматривается с различных позиций: и как ресурсный регион, обладающий кластерами определяющего развития, и как научно-инновационный конвейер, нуждающийся в перезагрузке процедур природопользования. Но в целом, по мнению ученых, Сибирский регион – это единый организм (макрорегион), развитие которого должно происходить не только за счет социальных возможностей населения и инвестиционных возможностей государства, но и за счет синергетических эффектов, производимых в том числе посредством производственного потенциала субъектов, его слагающих [17].

Однако пока весьма немногочисленны работы [18–20], в которых излагаются результаты исследований, связанных с перспективным устойчивым развитием промышленного потенциала региона либо повышением конкурентной устойчивости агропромодольственной сферы отдельных регионов страны и т. п.

В контексте вышеизложенного представляется достаточно инновационным подход, в котором устойчивость регионального развития предлагается оценить через железнодорожные перевозки. При этом грузовую массу (или погрузку) для этого «аспекта» перевозочной работы создают добывающие, сельскохозяйственные и лесозаготовительные производства региона, функционирующие в зонах тяготения железных дорог, которые его обслуживают.

Материалы и методы

В качестве исходных данных использовались выборочные материалы Федеральной службы государственной статистики. Данные ОАО «РЖД» использованы корректно, на основе сложившейся системы перевозки грузов (погрузки) по железным дорогам страны.

Методика исследования основана на классических аналитических подходах и сравнительных оценках, в которых ведущую роль сыграли тематические расчеты. При подготовке публикации применялись следующие методы: анализ, синтез, классификация, сравнение, описание, обобщение; табличные способы визуализации исследуемых данных. Поставленные задачи решались с применением известных формул.

Результаты исследования

Сибирский регион – это значительная по размеру территория, расположенная к востоку от Урала и занимающая четверть площади страны (4 361,7 тыс. км²). Внешний контур региона представлен на рисунке (с 2018 г. территории Республики Бурятия и Забайкальского края, расположенные на юго-востоке региона, входят в состав Дальневосточного федерального округа – ДФО).

В современных границах Сибирский регион – это 10 субъектов федерации: 3 республики, 2 края, 5 областей, разнообразных по охвату территории, населенности, но объединенных сетью транспортных коммуникаций, в которых ведущую роль играют железные дороги. Именно на их долю приходится основной объем перевозок массовых грузов.

Сравнительные показатели, раскрывающие данный аспект исследуемого региона, отражены в табл. 1.

Согласно табличным данным общая протяженность железных дорог региона составляет 12,7 тыс. км (14,6 % протяженности железных

дорог России). Но именно с железнодорожными перевозками связан основной объем так называемых отгруженных товаров собственного производства, созданных на предприятиях региона, в первую очередь добывающих.

Особенности производственной деятельности «грузоформирующих» предприятий исследуемого региона и стоимостные показатели результативности их труда отражены в табл. 2.

Согласно табличным данным участие продукции добывающих производств в формировании ВРП соответствующего субъекта РФ имеет различное значение – от малозначительного до преобладающего. Так, размеры долевого участия Омской области (0,4 %), Алтайского края (1,4 %), Новосибирской области (6,8 %) и Республики Алтай (7,1 %) не превышают 10,0 %. Показатели Республики Бурятия (17,8 %), Томской области (26,1 %), Республики Тыва (27,6 %), Красноярского края (30,2 %) достигают и незначительно превышают 30,0 %. Показатели развития добычи полезных ископаемых в Иркутской области (40,7 %), Республике Хакасии (43,2 %) и тем



Сибирский федеральный округ

Таблица 1

**Территориальные, демографические, транспортные показатели Сибирского региона
(на 01.01.2025) [21, 22]**

Субъект (область, край, республика)	Площадь территории, тыс. км ²	Населенность		Протяженность железных дорог	
		Численность, тыс. чел.	Плотность, тыс. чел./км ²	Всего, км	Густота, км пути/1000 км ²
<i>Зона тяготения Западно-Сибирской железной дороги</i>					
Омская область	141,1	1 818,1	12,9	728	5,2
Новосибирская область	177,8	2 789,5	15,7	1 506	8,5
Томская область	314,4	1 043,4	3,32	344	1,1
Кемеровская область – Кузбасс	95,7	2 547,7	26,6	1 681	17,5
Алтайский край	168,0	2 115,3	12,6	1 565	9,3
Республика Алтай	92,9	210,8	2,27	–	–
<i>Зона тяготения Красноярской железной дороги</i>					
Красноярский край	2 366,8	2 846,1	1,2	2 490	1,0
Республика Хакасия	61,6	528,2	8,6	667	10,8
Республика Тыва	168,6	337,5	2,0	–	–
<i>Зона тяготения Восточно-Сибирской железной дороги</i>					
Иркутская область	774,8	2 330,5	3,0	2 494	3,2
Республика Бурятия (ДФО)	351,3	971,9	2,8	1 227	3,5

Таблица 2

**Производственная деятельность добывающих предприятий Сибирского региона
(на 01.01.2025) [21]**

Субъект региона	ВРП*, млрд р.		Структура объема продукции, %			
	Всего	В том числе добыча ПИ**	Добыча угля	Добыча нефти и газа	Добыча руды	Добыча прочих ПИ
<i>Зона тяготения Западно-Сибирской железной дороги</i>						
Омская область	947	3,6	–	78,9	–	20,7
Новосибирская область	1 939	130,9	91,2	0,0	0,4	7,8
Томская область	809	211,3	–	90,6	0,2	0,6
Кемеровская область – Кузбасс	2 189	1 805,4	98,2	–	0,6	0,7
Алтайский край	945	13,2	2,1	–	60,8	36,6
Республика Алтай	92	6,5	–	–	84,0	16,0
<i>Зона тяготения Красноярской железной дороги</i>						
Красноярский край	3 319	1 003,4	3,1	70,2	18,3	2,0
Республика Хакасия	349	150,9	84,8	–	13,6	–
Республика Тыва	108	29,8	26,2	–	73,7	0,1
<i>Зона тяготения Восточно-Сибирской железной дороги</i>						
Иркутская область	2 357	960,3	2,7	71,0	13,4	1,2
Республика Бурятия (ДФО)	447	79,5	57,2	–	37,9	4,8

*ВРП – валовой региональный продукт.

**ПИ – полезные ископаемые.

более в Кемеровской области – Кузбассе (82,5 %) вносят весьма ощутимый вклад в формирование регионального продукта.

Структурные показатели свидетельствуют о том, что в таких субъектах, как Кемеровская и Новосибирская области, республики Хакасия и Бурятия, преобладающим производством является угледобыча, размер которой

превышает 50,0 %, а в Кемеровской области составляет почти 100 %.

По добыче углеводородного сырья выделяются Томская (90,6 %) и Омская (78,9 %) области, а также Иркутская область (71,0 %) и Красноярский край (70,2 %).

По рудным полезным ископаемым наиболее значительны долевые показатели Республики

Алтай (84,0 %) и Республики Тывы (73,0 %), а также Алтайского края (60,8 %). Менее значителен, но также весьма существен вклад в собственный ВРП, создаваемый в добывающем производстве, Республики Бурятия (37,9 %), Красноярского края (18,3 %), Республики Хакасии (13,6 %) и Иркутской области (13,4 %).

По добыче прочих полезных ископаемых выделяются Алтайский край (36,6 %) и Республика Алтай (16,0 %), а также Омская область (20,7 %). Доли других субъектов, предприятия которых осуществляют добычу главным образом нерудного сырья, менее значительны: от 7,8 % (Новосибирская область), 4,8 % (Республика Бурятия), 2,0 % (Красноярский край) и 1,2 % (Иркутская область) до десятых долей процента, приходящихся на добычу таких полезных ископаемых в Кемеровской и Томской областях, в Республике Тыве.

Ключевым показателем, отражающим товарно-транспортные результаты работы добывающих производств региона, являются объемы погрузки сырья, пригодного для железнодорожных грузовых перевозок. Сравнительные показатели грузовой работы такой направленности отражены в табл. 3.

Необходимо отметить, что по объемам погрузки всех видов грузов на долю железных дорог региона приходится 33,0 % от совокупного показателя всех железных дорог сети. Доля угольных грузов составляет 81,4 % от совокупного по сети показателя погрузки данного вида природного сырья.

По табличным данным видно, что именно уголь каменный является основным видом груза, объемы погрузки которого составляют

главную статью работы железных дорог региона: 73,0; 70,6 и 49,4 % соответственно. Не менее значимой по объемам погрузки является товарно-сыревая группа «руды всякие», объединяющая руды железные и марганцевые как руды черных металлов и руды разнообразных цветных металлов, месторождениями которых в особенности отличаются Алтайский край (зона тяготения Западно-Сибирской железной дороги – ЗСЖД) и Республика Бурятия (зона тяготения Восточно-Сибирской железной дороги – ВСЖД).

Также значимый показатель в погрузке имеет группа нефтяных грузов, где наиболее существенной является не столько сырья нефть, сколько перевозка «светлых» и «темных» нефтепродуктов. Безусловно, данный вид углеводородного сырья имеет основной способ транспортировки, обеспечивающийся системой трубопроводов, главным образом связывающих месторождения Сибирского региона с основными пунктами переработки – предприятиями Омской и Томской областей (зона тяготения ЗСЖД), Красноярского края (Ачинск, Красноярская железная дорога – КрасЖД) и Иркутской области (Ангарск, ВСЖД). Продукты нефтепереработки, нефтехимии, различные масла далее поступают потребителю, при деятельном участии обозначенных железных дорог региона.

В товарно-сыревую группу, в той или иной степени связанную с добычей исходного сырья (или лесозаготовками), были включены лесные грузы. Известно, что по производству «лесных необработанных материалов» – древесины или круглого леса, полученного из спиленных, сруб-

**Объемы погрузки товаров сырьевой группы, выполненной железными дорогами региона
(на 01.01.2025), %***

Товарно-сыревая группа	Железная дорога		
	Западно-Сибирская	Красноярская	Восточно-Сибирская
Уголь каменный	73,3	70,6	49,4
Нефть и нефтепродукты	8,0	7,85	14,8
Руды всякие (черных и цветных металлов)	3,4	8,6	8,1
Лесные грузы	0,4	1,25	4,6
Хлебные грузы (зерно)	1,7	1,25	0,2
Прочие (кокс, черные металлы, готовый прокат, стальные трубы, полуфабрикаты, удобрения, цемент, химикаты и другие)	13,2	10,3	22,8
<i>Итого</i>	100	100	100

*Источник: форма ГО-10 (для служебного пользования); объемы и структура отправок принятые по данным для служебного пользования.

ленных, срезанных стволов деревьев, Сибирский федеральный округ (СФО) занимает второе место в стране (после Северо-Западного федерального округа). В пределах СФО лесоматериалы такого вида заготавливаются преимущественно в Иркутской области – 17,0 млн плотных м³ (ВСЖД), Красноярском крае – 9,5 млн плотных м³ (КрасЖД), Томской области – 4,5 млн плотных м³ (ЗСЖД) [21]. Поэтому участие в перевозке данных групп грузов весьма показательно для железных дорог региона.

Другой товарно-сырьевой группой, производство продукта в которой также во многом связано с наличием исходных природных ресурсов, в данном случае климатических, обуславливающихенный баланс тепла и влаги, при котором распространено растениеводство как часть сельскохозяйственного производства, является производство зерна. Именно зерно как основная часть «хлебных грузов» участвует в погрузке, размер которой составляет 1,7 % (ЗСЖД), где высокие абсолютные показатели по валовому сбору зерна имеют Алтайский край – 4,5 млн т и Омская область – 2,5 млн т. Доля зерна в погрузке КрасЖД составляет 1,25 % преимущественно за счет показателя валового сбора зерна именно в Красноярском крае – 2,5 млн т. Доля ВСЖД в погрузке хлебных грузов составила всего 0,2 %, поскольку в Иркутской области валовой сбор зерна составил чуть более 0,8 млн т. Показатель Республики Бурятия совсем невелик – 0,14 млн т.

Группа «прочие грузы», включающая такие виды, как кокс, черные металлы, готовый прокат, стальные трубы, полуфабрикаты,

удобрения, цемент, химикаты и другие, представляет продукты *перерабатывающих производств* и в оценочных расчетах имела опосредованное значение.

Чтобы раскрыть современный уровень хозяйственного развития региона и оценить его с позиций устойчивости, необходимо руководствоваться следующим. Объемы производства любой продукции по различным видам экономической деятельности принято соизмерять с численностью населения в стране, федеральном округе. То есть в РФ – это 146,1 млн чел., в СФО – 16,6 млн чел. Тогда доля населения СФО составляет примерно 11,4 % численности населения страны. Дальнейший путь решения задачи состоит в определении коэффициентов специализации производства, формирующих хозяйственный комплекс региона: добывающих, лесозаготовительных, сельскохозяйственных – всех тех, производство продукции в которых основано на использовании имеющегося природно-ресурсного потенциала и составляет существенную часть погрузки товаров сырьевой группы, выполненной железными дорогами региона:

$$K_{\text{спец}} = P / H,$$

где P – доля СФО в производстве (по видам экономической деятельности) относительно РФ; H – доля СФО в населении относительно показателя РФ.

При выполнении расчетов использовались исходные данные из открытых статистических источников. Результаты расчетов отражены в табл. 4.

По данным таблицы видно, что по стоимостной оценке добывающие предприятия СФО

Таблица 4

Современный хозяйственный потенциал региона (на 01.01.2025)

Показатель	Россия	СФО	Коэфф. специализации*
Стоимость ВРП, млрд р.	140 671	13 054	–
Численность населения, тыс. чел.	146,1	16,6	–
Производства, основные в формировании погрузки: сельскохозяйственные, лесозаготовительные	5 908,2	600,5	0,89
добычающие	20 397,3	2 793,5	1,2
транспортировка и хранение	9 706,3	966,0	0,88
Другие производства: обрабатывающие	22 929,4	2 154,0	0,82
строительство	7 737,0	757,1	0,86
торговля оптовая и розничная	21 100,7	1 292,3	0,54
прочие, включая нематериальное	52 892,2	4 490,6	0,75

* $K_{\text{спец}} \geq 1,0$ – производства считаются явно формирующими специализацию хозяйственного комплекса региона и определяют устойчивость его современного состояния; $K_{\text{спец}} \geq 0,8$ – высокий уровень развития производств; $K_{\text{спец}} \geq 0,7$ – средний уровень; $K_{\text{спец}} \leq 0,5$ – низкий.

являются ведущими в его хозяйственном комплексе, во многом определяющими производственную специализацию региона. Их вклад в ВРП страны составляет 13,7 %. Им уступают, хотя и незначительно, сельскохозяйственные и лесозаготовительные предприятия, производственный профиль которых также связан с природно-ресурсными особенностями региона. Вклад этих производств в ВРП страны – 10,2 %. Из других производств достаточно «представительно» выглядят региональные показатели строительства и обрабатывающих производств, вклад которых составляет 9,8 и 9,4 % соответственно. Вместе с тем региональные показатели торговли оптовой и розничной равны всего 6,1 %; других производств, включая группу нематериальных, – 8,5 %.

Выводы

Коэффициенты специализации, во многом отражающие современное хозяйственное развитие региона, свидетельствуют, что в настоящее время именно добывающие производства СФО с $K_{спец} = 1,2$ формируют его устойчивость.

Кроме того, такие виды экономической деятельности, как сельское хозяйство, лесозаготовки, транспортировка и хранение, также в немалой степени содействуют устойчивому развитию Сибирского региона. Нематериальные и другие производства в настоящее время не являются определяющими для региона в целом, хотя

и играют значимую роль в развитии хозяйства и формировании устойчивости производственных комплексов отдельных субъектов СФО, например Новосибирской области.

Представляется, что научный вклад работы заключается в использовании предложенного статистического и расчетно-аналитического инструментария для научного обоснования роли и места железнодорожных перевозок в формировании устойчивого развития одного из важных регионов страны.

Направление будущих исследований заключается в расширении набора факторов и условий для учета как региональных особенностей развития железнодорожных перевозок, так и экспортно-ориентированных направлений; более содержательной оценки связности субъектов и региона в целом, а также зон ближайшего соседства, включая зарубежные страны. Объем перевозок напрямую зависит от производства соответствующего вида груза, спроса на него, а также структурно-технологических параметров соответствующей железнодорожной транспортной инфраструктуры. В России именно железные дороги имеют прямое влияние на индустриальное развитие, логистику и региональную интеграцию всех субъектов, образующих единое российское экономическое пространство и формирующих его устойчивость.

Список источников

1. Устойчивое развитие : методология и методики измерения / С. Н. Бобылев, Н. В. Зубаревич, С. В. Соловьева, Ю. С. Власов ; под ред. С. Н. Бобылева. Москва : Экономика, 2011. 358 с.
2. Устойчивое развитие регионов и городов Поволжья : коллективная монография / под ред. С. М. Никонорова, С. В. Соловьевой, К. С. Ситкиной. Москва : МГУ, 2020. 256 с.
3. Василенко В. А. Устойчивое развитие регионов : подходы и принципы / под ред. А. С. Новоселова. Новосибирск : ИЭОПП СО РАН, 2008. 208 с.
4. Котляков В. М., Тишков Р. А. Стратегические ресурсы и условия устойчивого развития Российской Федерации и ее регионов. Москва : Институт географии РАН, 2014. 166 с.
5. Захарова Е. Н., Бахова Я. С. Устойчивое развитие территории : теоретические основы и стратегический подход к реализации // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2020. Т. 10, № 6А. С. 55–63.
6. Фаузер В. В., Смирнов А. В. Международные и российские подходы к изучению устойчивого развития городского пространства: от теории к практике // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2023. Т. 16, № 1. С. 85–102.
7. Бобылев С. Н., Кудрявцева О. В., Соловьева С. В. Индикаторы устойчивого развития для городов // Экономика региона. 2014. № 3. С. 101–110.
8. Морковкин Д. Е. Социально-экономические аспекты устойчивого развития экономики территорий // Вестник Московского университета имени С. Ю. Витте. Сер. 1 «Экономика и управление». 2014. № 1 (7). С. 4–10.
9. Коршунов И. В. Устойчивое развитие в стратегиях регионов: выбираемые подходы и решения // Экономика региона. 2023. Т. 19, вып. 1. С. 15–28.
10. Алферова Т. В. Устойчивое развитие региона: подходы к отбору показателей оценки // Вестник Пермского университета. Сер. «Экономика». 2021. Т. 15, вып. 4. С. 494–511.

11. Шимановский Д. В., Третьякова Е. А. Моделирование социо-экологического взаимосвязей как способ оценки устойчивого развития регионов РФ // Вестник Пермского университета. Сер. «Экономика». 2020. Т. 15, вып. 3. С. 369–384.
12. Инструменты оценки устойчивости развития территорий с учетом кластерных эффектов / И. С. Ферова, Е. В. Лобкова, Е. Н. Таненкова, С. А. Козлова // Журнал СФУ. Гуманитарные науки. 2019. Т. 12, вып. 4. С. 600–626.
13. Системное моделирование и анализ мезо- и микроэкономических объектов / отв. ред. В. В. Кулешов, Н. И. Суслов ; РАН, Сибирское отделение. Новосибирск : ИЭОПП СО РАН, 2014. 487 с.
14. Проработка и запуск первых кластеров опережающего развития Центральной и Восточной Сибири. Приложения. Москва, апрель 2019. 76 с.
15. Ресурсные регионы России в «новой реальности» / отв. ред. В. В. Кулешов ; Новосибирск : Изд-во ИЭОПП СО РАН, 2017. 307 с.
16. Суслов В. И. Сибирь как мегарегион: экономические параметры и стратегии развития // Сибирь как мегарегион: параметры и цели / под науч. ред. В. И. Супруна. Новосибирск : ФСПИ «Тренды», 2018. С. 70–86.
17. Сибирский вектор развития: в основе кооперация и взаимодействие / В. А. Крюков, Б. Л. Лавровский, В. Е. Селиверстов [и др.] // Проблемы прогнозирования. 2020. № 5. С. 46–58.
18. Вегнер-Козлова Е. О. Перспективы развития промышленного региона в контексте целей устойчивого развития // Вестник Южно-Российского государственного технического университета. Сер. «Социально-экономические науки». 2021. Т. 14, вып. 5. С. 77–85.
19. Алексеев А. Н. Повышение конкурентной устойчивости агропродовольственной сферы северных регионов России // Транспортное дело России. 2011. № 6 (91). С. 122–124.
20. Филимонова И. В., Проворная И. В. Прогноз добычи газа в Республике Саха (Якутия) с учетом структуры сырьевой базы, транспортной обеспеченности, потребностей внутреннего и внешнего рынков // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2024. № 2 (187). С. 46–56.
21. Регионы России. Социально-экономические показатели : статистический сборник : 2024 / Росстат. Москва, 2024. 1081 с.
22. Российский статистический ежегодник. 2024 : статистический сборник / Росстат. Москва, 2024. 630 с.

References

1. Bobylev S. N., Zubarevich N. V., Solovieva S. V., Vlasov Yu. S. Edited by S. N. Bobylev. Sustainable development: methodology and measurement techniques. Moscow: Ekonomika; 2011. 358 p. (In Russ.).
2. Sustainable development of regions and cities of the Volga region: collective monograph. Edited by S. M. Nikonorov, S. V. Solovieva, K. S. Sitkina. Moscow: Moscow State University; 2020. 256 p. (In Russ.).
3. Vasilenko V. A. Edited by A. S. Novoselov. Sustainable development of regions: approaches and principles. Novosibirsk: IEOPP SB RAS; 2008. 208 p. (In Russ.).
4. Kotlyakov V. M., Tishkov R. A. Strategic Resources and Conditions for Sustainable Development of the Russian Federation and Its Regions. Moscow: Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences; 2014. 166 p. (In Russ.).
5. Zakharova E. N., Bakhova Ya. S. Sustainable Development of the Territory: Theoretical Foundations and Strategic Approach to Implementation. *Economy: Yesterday, Today, Tomorrow*. 2020;10(6A):55–63.
6. Fauser V. V., Smirnov A. V. International and Russian Approaches to the Study of Sustainable Development of Urban Space: from Theory to Practice. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*. 2023;16(1):85–102. (In Russ.).
7. Bobylev S. N., Kudryavtseva O. V., Solovieva S. V. Sustainable Development Indicators for Cities. *Economy of the Region*. 2014;(3):101–110.
8. Morkovkin D. E. Socio-economic aspects of sustainable development of territorial economies. *Bulletin of the Moscow University named after S. Yu. Witte. Series 1. Economy and Management*. 2014;(7):4–10. (In Russ.).
9. Korshunov I. V. Sustainable development in regional strategies: selectable approaches and solutions. *Economy of the Region*. 2023;19(1):15–28. (In Russ.).
10. Alferova T. V. Sustainable development of the region: approaches to the selection of assessment indicators. *Bulletin of Perm University. Series “Economics”*. 2021;15(4):494–511. (In Russ.).
11. Shimanovsky D. V., Tretyakova E. A. Modeling of socio-ecological-economic relationships as a way to assess the sustainable development of Russian regions. *Bulletin of Perm University. Series: Economics*. 2020;15(3):369–384. (In Russ.).
12. Ferova I. S., Lobkova E. V., Tanenkova E. N., Kozlova S. A. Tools for assessing the sustainability of territorial development taking into account cluster effects. *Journal of SFU. Humanities*. 2019;12(4):600–626. (In Russ.).

13. System modeling and analysis of meso- and microeconomic objects. RAS, Siberian Branch. Edited by V. V. Kuleshov, N. I. Suslov. Novosibirsk: IEIE SB RAS; 2014. 487 p. (In Russ.).
14. Development and launch of the first advanced development clusters of Central and Eastern Siberia. Appendices. Moscow, April 2019. 76 p. (In Russ.).
15. Resource regions of Russia in the ‘new reality’. Edited by V. V. Kuleshov. Novosibirsk: Publishing house of IEIE SB RAS; 2017. 307 p. (In Russ.).
16. Suslov V. I. Siberia as a mega-region: economic parameters and development strategies. *Siberia as a Mega-region: Parameters and Goals*. Under the scientific ed. V. I. Suprun. Novosibirsk: FSPI “Trends”; 2018. P. 70–86. (In Russ.).
17. Kryukov V. A., Lavrovsky B. L., Seliverstov V. E. [at al.]. Siberian vector of development: cooperation and interaction at the core. *Problems of Forecasting*. 2020;(5):46–58. (In Russ.).
18. Wegner-Kozlova E. O. Prospects for the development of an industrial region in the context of sustainable development goals. *Bulletin of the South-Russian State Technical University. Series: Social and Economic Sciences*. 2021;14(5):77–85. (In Russ.).
19. Alekseev A. N. Improving the competitive sustainability of the agro-food sector in the northern regions of Russia. *Transport Business of Russia*. 2011;(91):122–124. (In Russ.).
20. Filimonova I. V., Provornaya I. V. Forecast of gas production in the Republic of Sakha (Yakutia) taking into account the structure of the raw material base, transport security, needs of the domestic and foreign markets. *Mineral Resources of Russia. Economy and Management*. 2024;(187):46–56. (In Russ.).
21. Regions of Russia. Socio-economic indicators. 2024. Stat. collection. Rosstat. Moscow; 2024. 1081 p. (In Russ.).
22. Russian statistical yearbook. 2024. Statistical proceedings. Rosstat. Moscow; 2024. 630 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Н. Б. Попова – доктор географических наук, профессор, профессор кафедры «Экономика транспорта» Сибирского государственного университета путей сообщения.
К. С. Марийченко – аспирант Сибирского государственного университета путей сообщения.
И. М. Меркулов – аспирант Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

N. B. Popova – Doctor of Geographical Sciences, Professor, Professor of the Transport Economics Department, Siberian Transport University.
K. S. Mariychenko – a Postgraduate Student, Siberian Transport University.
I. M. Merkulov – Postgraduate Student, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 24.04.2025; одобрена после рецензирования 24.06.2025; принята к публикации 30.06.2025.
The article was submitted 24.04.2025; approved after reviewing 24.06.2025; accepted for publication 30.06.2025.

Научная статья
УДК 628.517.2
doi:10.52170/1815-9265_2025_75_14

Подход к подбору средств и методов защиты от шума вагонных замедлителей

Елена Анатольевна Калиниченко

Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия, kalinka717@mail.ru

Аннотация. Стратегией научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года к перспективным направлениям отнесена разработка и внедрение технологий и устройств снижения и активного подавления шума в районах, прилегающих к территории железнодорожного транспорта.

На предприятиях железнодорожного транспорта одним из источников, создающих чрезвычайно высокие уровни шума, являются вагонные замедлители. Средства активного шумоподавления пока не в достаточной степени разработаны для применения на открытых территориях. До сих пор единственными средствами снижения шума, которые не влияют на уровень безопасности или скорость процесса роспуска составов, являются акустические экраны.

В результате проведенных измерений на территории сортировочной станции были определены спектральные уровни шума, эквивалентные и максимальные уровни шума в процессе вытормаживания отцепов клаццевидными вагонными замедлителями. Измеренные уровни шума превышают допустимые значения на территории станции и ближайшей жилой застройки. Превышение установлено даже при наличии акустического экрана, который, хотя не снизил уровень шума до допустимых значений, но позволил улучшить условия для проживания. Отмечена группировка пиковых значений уровней звука на частотах 2 000 и 4 000 Гц, при этом генерация высоких уровней шума не всегда связана с массой вытормаживаемого отцепа.

На основе проведенного анализа территорий сортировочных станций и результатов измерений представлены принципиальные расчетные схемы для определения затухания шума от вагонных замедлителей и варианты выбора комбинации средств защиты. Результаты расчетов затухания шума в расчетной точке на территории жилой застройки свидетельствуют о необходимости корректировки методики расчета: на некоторых частотах результаты измерений существенно превышают расчетные с учетом допустимых по методике значений точности расчета ± 3 дБ.

Ключевые слова: шум, вагонные замедлители, сортировочные станции, акустический экран, звукоизоляция, звукопоглощение

Для цитирования: Калиниченко Е. А. Подход к подбору средств и методов защиты от шума вагонных замедлителей // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 3 (75). С. 14–22. DOI 10.52170/1815-9265_2025_75_14.

Original article

Approach to the selection of means and methods of protection against the noise of wagon retarders

Elena A. Kalinichenko

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia, kalinka717@mail.ru

Abstract. The strategy for the scientific and technological development of the Russian Railways Holding Company for the period up to 2025 and for the period up to 2030 includes the development and implementation of technologies and devices for noise reduction and active noise suppression in areas adjacent to railway transport.

At railway transport enterprises, one of the sources of extremely high noise levels is car retarders. Active noise reduction measures have not yet been sufficiently developed for use in open areas. So far, acoustic baffles have been the only effective noise reduction measures that do not affect the safety or speed of the train unloading process.

As a result of measurements carried out in the marshalling yard area, spectral noise levels, equivalent and maximum noise levels were obtained during the unbraking of unhitched wagons by claw-shaped wagon retarders. The measured noise levels exceed the permissible values both on the territory of the station and on the territory of the nearest residential area. The exceedance was established even in the presence of an acoustic screen. The acoustic screen, although not reducing noise levels to permissible values, has improved living conditions. The grouping of peak values of sound levels at frequencies of 2000 and 4000 Hz was noted, and the generation of high noise levels is not always related to the mass of the braked detachment.

On the basis of the analysis of marshalling yards and measurement results, the principal calculation schemes for the calculation of noise attenuation from wagon retarders and options for selecting the combination of protection means are presented. The results of calculations of noise attenuation at the design point in the residential area show the need to adjust the calculation, because at some frequencies the results significantly exceed the standard calculation accuracy of ± 3 dB.

Keywords: noise, wagon retarders, marshalling yards. acoustic screen, sound insulation, sound absorption

For citation: Kalinichenko E. A. Approach to the selection of means and methods of protection against the noise of wagon retarders. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(75):14–22. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_75_14.

Введение

Прогресс в науке и технике пока не позволяет оградить человека в процессе трудовой деятельности от вредного воздействия производственных факторов. По данным Росстата, из всех вредных факторов производственной среды на рабочих местах шум, ультра- и инфразвуки совместно занимают первое место [1, с. 121], причем во многих видах экономической деятельности. Не является исключением и работа предприятий железнодорожного транспорта. Статистика показывает, что по объединенной позиции «транспорт и хранение» в 2022 г. в условиях воздействия шума трудится 11,5 % работников.

Одним из специфичных источников шума на железнодорожном транспорте являются вагонные замедлители сортировочных станций. В процессе вытурмаживания отцепов замедлителями генерируются высокочастотные звуки высокой интенсивности. Эти звуки распространяются на значительное расстояние, более 1 км, формируя не только вредные условия труда для работников, но и некомфортные условия для проживания людей на прилегающих селитебных территориях.

Известно, что воздействие шума, превышающего предельно-допустимые уровни (ПДУ), приводит к развитию заболеваний органа слуха человека, а также к другим неспецифическим, т. е. не связанным с органом слуха, заболеваниям и состояниям. Стоит отметить, что исследования, касающиеся развития профессиональной нейро-сенсорной тугоухости, сосредоточены в основном на воздействии именно высокочастотных, иногда среднечастотных шумов [2, с. 20].

Учитывая это, совершенствование условий труда работников предприятий железнодорожного транспорта, а также условий проживания людей на прилегающих к станциям территориях имеет большое значение для сохранения их здоровья и комфорта.

Вагонные замедлители, как источник шума, представляют собой сложный объект для реали-

зации мероприятий по защите от последнего. Создаваемые ими эквивалентные и максимальные уровни звука очень высоки – более 100 дБ. Решение проблемы осложняется тем, что зачастую жилые территории располагаются недалеко от территории сортировочной станции, на расстоянии порядка 100–200 м.

С учетом специфики характеристик шума тормозных позиций и особенностей расположения территорий с нормируемым качеством окружающей среды требуется применение системного подхода к решению проблемы защиты от шума. В работе [3] описан системный подход к решению данной проблемы без рассмотрения конкретных источников шума и их особенностей, с акцентированием внимания на средствах защиты на пути распространения шума.

В настоящей работе представлен подход к выбору средств защиты от шума с учетом источника, в качестве которого рассматриваются вагонные замедлители в процессе вытурмаживания вагонов.

Материалы и методы

Разработка шумозащитных мероприятий должна выполняться на основе результатов измерения и анализа характеристик звуков, возникающих при вытурмаживании отцепов, для определения требуемого снижения шума. Такие измерения были выполнены на первой тормозной позиции одной из внеклассных сортировочных станций. Выбор обусловлен несколькими причинами. На этой тормозной позиции наиболее часто и с большой продолжительностью применяются высокие ступени торможения, при этом первая тормозная позиция близко расположена к территории жилой застройки.

С целью подбора средств защиты от шума был выполнен анализ эффективности и возможности применения средств защиты в источнике и на пути распространения. Для определения шумовых характеристик измерения выполнялись в соответствии с Методикой измерения шума от вагонных замедлителей на сортировочных горках, утвержденной приказом ОАО «РЖД» от

13.12.2021 № ЦБТ-66. Не все требования методики удалось соблюсти на практике, однако это не оказалось кардинального влияния на результаты, необходимые для целей работы.

Измерения проводили в теплый период года шумометром 1-го класса «Экофизика-110», калибровку выполняли калибровочным устройством «Защита-К», измерение скорости ветра – термоанемометром Testo-405. Измерения на территории станции выполнены в дневное время суток, на территории ближайшей к тормозным позициям жилой застройки – в дневное и ночное время. Было выполнено 24 измерения.

ПДУ определены по СП 51.13330.2011 «Задача от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003» (с изменением № 1). В качестве ПДУ приняты уровни для территории предприятий с постоянными рабочими местами – рабочими местами составителей поездов. Для оценки условий во дворах жилых домов принятые ПДУ для территорий, непосредственно прилегающих к жилым домам.

Выбор средств защиты от шума основан на анализе характеристик средств, представленных в научных источниках, и отчасти на собственных экспериментальных данных.

Проблемой защиты от шума вообще и при вытормаживании отцепов в частности исследо-

ватели занимаются достаточно давно. Так, до сих пор используются результаты исследований шумозащитных экранов, полученные в 1960–1970-х гг. З. Маекава и др., например [4]; использование резонансных звукопоглощающих систем представлено работами 1930-х гг., слоистых звукопоглощающих конструкций – 1940-х гг. Предложенные ранее способы защиты от шума, а также методы их расчета на сегодняшний день продолжают совершенствоваться.

Разрабатываются современные, принципиально новые средства защиты от шума, например, в [5] представлен способ активного шумоподавления, который может быть применен на открытой площадке. Однако такие средства защиты продолжают изучаться и пока не реализованы в виде промышленных образцов.

Результаты исследования

По результатам измерений, проведенных на территории сортировочной станции, построена диаграмма, в пояснении к которой отцепы расположены в порядке возрастания массы (рис. 1).

Анализ полученных данных показал, что наибольшие значения уровней звука закономерно зафиксированы при вытормаживании отцепов сравнительно большой массы. Это связано с применением более высоких ступеней тормо-

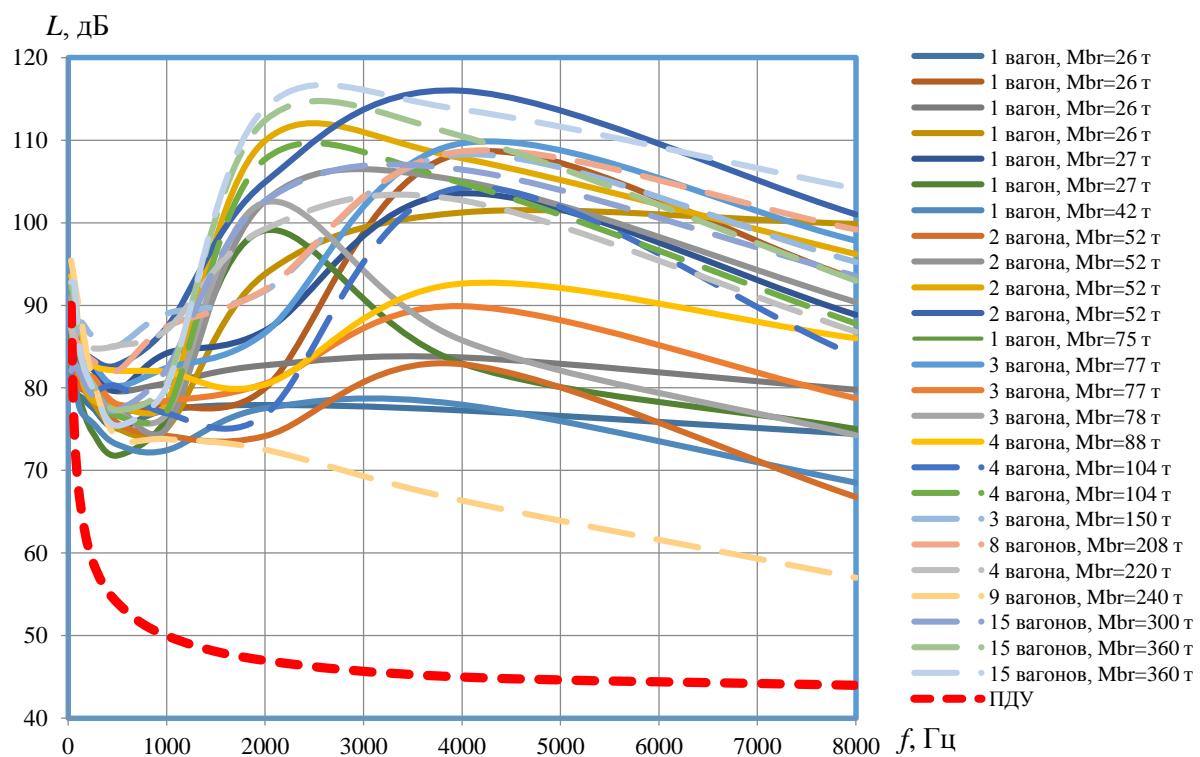


Рис. 1. Уровни шума на среднегеометрических частотах, измеренных днем на территории станции: пунктируемые линии – отцепы массой брутто (Mbr) 100 т и более

жения. Однако значительная масса – это неизбежное условие для создания таких громких звуков. Встречались отцепы и с меньшей массой, но уровни звука при этом были высокими. Предположительно, это связано с флюктуирующей силой трения, которая возникает из-за деформаций шероховатостей или их адгезионного взаимодействия с сопряженной поверхностью, а также с отделением частиц износа поверхностей ободов и боковых поверхностей колес [6].

Нет превышений только на частоте 31,5 Гц. Затем частота встречаемости превышений увеличивается, и, начиная с 500 Гц, во всех измерениях уровни шума превышали принятую норму для постоянных рабочих мест на территории предприятия.

Отмечены несколько частот, на которых колеблющаяся система получала наибольший отклик. Преимущественно это частоты 2 000 и 4 000 Гц (см. рис. 1). Кроме того, пиковые значения уровней шума наблюдались на частотах 3 150 и 5 000 Гц. Полученные результаты измерений требуют дополнительного изучения и установления зависимостей.

Измерения, проведенные на территории ближайшей жилой застройки в тот же период времени, показали превышения на всех частотах, кроме 31,5 Гц.

Возведенный напротив первой тормозной позиции акустический экран привел к снижению уровня шума, что отмечают жильцы первых этажей. Однако не обеспечил достижения ПДУ. Это подтверждается измерениями в ночное время,

когда шум от других источников, в частности от автодороги, сводится к минимуму (рис. 2).

Из полученных результатов следует, что необходимо найти решение, которое позволит снизить уровни максимального шума на среднегеометрических частотах в источнике на величину до 60 дБ (4 000 Гц).

Анализ взаимного расположения наиболее шумных первых тормозных позиций и ближайшей жилой застройки для важнейших сортировочных станций России показал, что около половины из них расположены на расстоянии примерно от 100 до 200 м.

При расположении жилой застройки на расстоянии около 100 м требуемое снижение шума может составить значения, полученные по результатам измерения на территории, прилегающей к ближайшему к первой тормозной позиции жилому дому, и представленные в качестве примера в табл. 1 (превышение имеет отрицательное значение). За уровни шума при вытормаживании отцепов на селитебной территории приняты результаты измерений в ночное время, так они позволили исключить влияние других источников шума.

Таким образом, измеренные уровни шума существенно превышают допустимые значения: от 250 до 8 000 Гц.

Предлагается следующий подход к классификации способов защиты от шума сортировочных станций:

- 1) предотвращение генерации звука в источнике (вагонные замедлители/вагонное колесо);

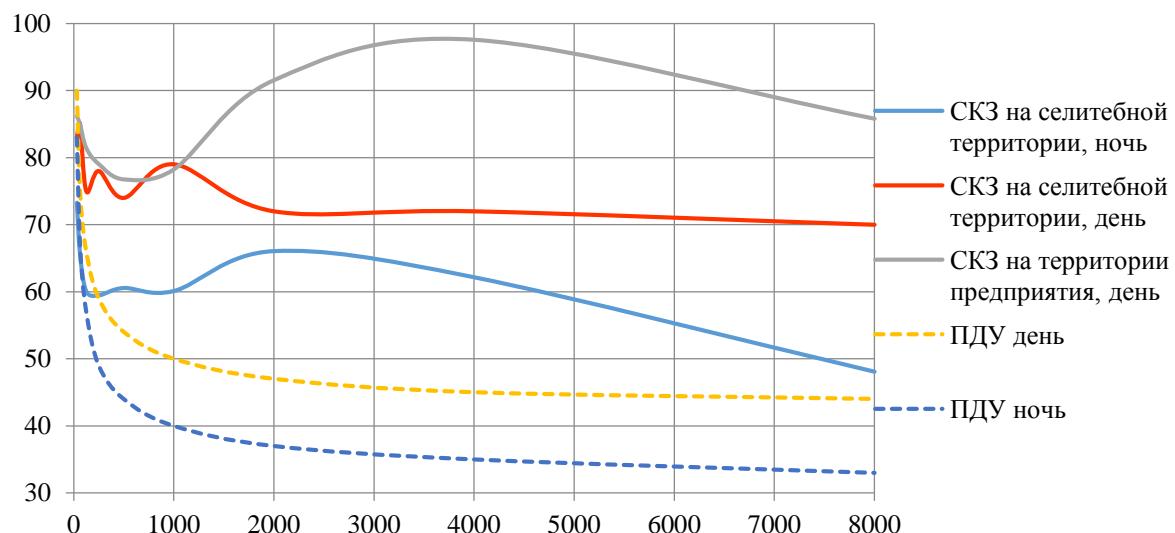


Рис. 2. Сравнение среднеквадратичных значений (СКЗ по трем замерам) уровней шума на территории станции, на ближайшей жилой территории и ПДУ для селитебных территорий

Таблица 1

Требуемое снижение шума на расстоянии 100 м от вагонного замедлителя

Показатель	Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц									Эквивалентный уровень шума, дБА	Максимальный уровень шума, дБА
	31,5	63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000		
Уровни шума на территории, прилегающей к ближайшему жилому дому, дБ	77	69	64	63	65	67	70	70	56	65	65
ПДУ на территориях, прилегающих к жилым домам, дБ:											
день	90	75	66	59	54	50	47	45	44	55	70
ночь	83	67	57	49	44	40	37	35	33	45	60
Требуемое снижение шума, дБ:											
день	13	6	2	-4	-11	-17	-23	-25	-12	-10	5
ночь	6	-2	-7	-14	-21	-27	-33	-35	-23	-20	-5

2) звукоизоляция на пути распространения звука;

3) звукопоглощение на территории распространения звука;

4) звукоизоляция нормируемого объекта.

Для уменьшения взаимодействия шероховатостей, снижения силы трения используют лубриканты, которые разными способами наносятся на поверхность обода колеса [7]. Такой способ борьбы с шумом в источнике имеет высокую эффективность. Однако снижение уровня или исключение генерации звуков неизбежно снижает и силу трения, что оказывается на эффективности вытормаживания. Недостаточное снижение скорости отцепа может привести к столкновению с впередистоящим составом с повышенной скоростью и, как следствие, к аварийной ситуации или к сходу отцепа из-за наезда гребнем колеса на головку рельса.

Используются также принципиально иные способы регулирования скорости отцепов, основанные на поглощении кинетической энергии гидравлическими устройствами: домкратовидные, спиралевидные (шнековые) замедлители. Как показала практика их применения, эти устройства приводят к снижению производительности на горках большой мощности.

Еще одним кардинально отличающимся средством вытормаживания отцепов являются электромагнитные тормоза. Такой способ предложен довольно давно. Недавние результаты реализации этого способа представлены в работе польских исследователей [8, с. 114–118]. На сегодняшний день нет данных о результатах применения электромагнитных тормозов на горках большой мощности.

Преграду на пути распространения звука может обеспечить рельеф: земельные валы или расположение в понижении местности; здания, акустические экраны. Изучение рельефа местности наиболее важных сортировочных горок (согласно перечню, утвержденному распоряжением ОАО «РЖД» от 22.10.2007 № 2019р) в районах расположения первых тормозных позиций показало, что тормозные позиции располагаются примерно на одном уровне с жилыми домами или на возвышенностях. Изучение выполнено с помощью интернет-сервиса Google Earth Pro.

Эффективность применения средств защиты на пути распространения звука зависит не только от характеристик самих средств (размеров, отражающей/поглощающей способности), но и от особенностей взаимного расположения вагонного замедлителя, экранирующей преграды и территории или объекта с нормируемым качеством среды. Так, в работе [9] показана ожидаемо низкая эффективность преград на существенном их удалении от источника шума, также в условиях многоэтажной застройки.

Результаты расчетов, выполненных по ГОСТ 31295.2–2005 «Шум. Затухание звука при распространении на местности», и измерений уровней шума на территории жилой застройки при использовании акустического экрана, проведенных автором, существенно отличаются (табл. 2).

Предположительно, отличия связаны с многочисленными отражениями от фасадов домов, шумозащитного экрана и др., что может приводить к усилению звука.

Отражающие поверхности строений на территории распространения звука могут вносить

Таблица 2

**Результаты расчета затухания шума на территории жилой застройки
на расстоянии 144 м от вагонного замедлителя**

Показатель	Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц							
	63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
Превышение уровня шума над ПДУ(ночь) по результатам расчета, дБ	-2	-3	-6	-10	-11	-16	-13	-7
Превышение уровня шума над ПДУ по результатам измерений (без учета вклада автодороги, ночь), дБ	-	-	-6,7	-17	-14	-27,7	-28,7	-16,6

определенный вклад в шумопоглощение. На территории предприятий железнодорожного транспорта часто можно встретить здания с гладкой твердой облицовочной плиткой, аналогичным образом отделяются и некоторые ремонтируемые и строящиеся здания. Такие материалы облицовки ухудшают шумовой (акустический) климат на территории распространения звука. Применение звукопоглащающих облицовок, покрытий позволило бы снизить уровень шума на территориях с нормируемым качеством среды.

К средствам звукопоглощения на территории распространения звука (с нормируемым качеством среды) можно отнести зеленые насаждения. В кронах деревьев и кустарников преобладают процессы затухания звуковой волны, а не отражения. Покров травянистых растений также обеспечивает шумопоглощение на территории распространения звука (лиственные, хвойные) [10].

Звукоизолирующей способности современных (с исправными уплотнителями) окон, а также стен капитальных строений достаточно для снижения шума до нормативных значений в помещениях. Проблема заключается в том, что, согласно требованиям [11], уровни шума в помещении должны соответствовать установленным нормам при условии проветривания. Зачастую проветривание обеспечивается через открытые окна. В таком случае шум от расположенных рядом тормозных позиций превышает допустимые нормы в помещениях. Выходом в такой ситуации может стать установка систем проветривания с функцией шумозащиты в квартирах.

В табл. 3 представлены значения эффективности средств защиты от шума и возможные ограничения их применения.

Исходя из условий взаимного расположения тормозных позиций и селитебных терри-

торий можно рассматривать две основных принципиальных схемы расчета шума (рис. 3).

Выбор мероприятий по защите от шума обусловлен следующими критериями:

- мощность сортировочной горки, от которой зависит частота возникновения шума и его продолжительность;
- расстояние до ближайшей жилой застройки;
- этажность зданий жилой застройки (с учетом рельефа).

Для горок средней или малой мощности в качестве средства борьбы с шумом могут применяться: лубрикация поверхностей трения (колесо / тормозная шина) и/или устройство домкратовидных замедлителей. Этого может быть достаточно, другие средства защиты могут не понадобиться.

Для горок большой или повышенной мощности могут применяться звукопоглащающие акустические экраны. При расстоянии между экраном и первым эшелоном жилых домов около 100–150 м, особенно если в этом промежутке расположена автомобильная дорога, следует применять звукопоглащающую обработку отражающих поверхностей: фасадов зданий, поверхности акустического экрана, обращенной к жилой застройке. Это позволит избежать многократного отражения и усиления звука. Для обеспечения нормативных требований в жилых помещениях необходимо устанавливать системы проветривания с функцией шумозащиты.

Если позволяет расстояние, необходимо провести озеленение территории древесно-кустарниковой растительностью. Деревья не обладают такой защитой от шума, как экраны, но они значительно выше и снижают уровень шума на верхних этажах зданий.

Данные табл. 3 позволяют считать, что реализация вышеуказанных мероприятий для горок

Таблица 3

**Эффективность средств защиты, которые могут быть применены
для защиты от шума сортировочных станций**

Средство	Возможности (ограничения) применения	Эффективность
Лубрикация поверхности обода колеса перед въездом на тормозную позицию	Не подходят для сортировочных горок большой мощности. Загрязнение пути	До 45 дБ на среднегеометрических частотах или до норм СанПиН
Замена клещевидных замедлителей на домкратовидные	Не подходят для сортировочных горок большой мощности	Нет данных. Предполагается ударный шум от наезда на замедлитель
Замена клещевидных замедлителей на электромагнитные	Недостаточно экспериментальных данных	До норм СанПиН
Установка акустического экрана	Эффект на высоте экрана. На этажах, расположенных выше него, эффекта нет. Эффективность зависит от расстояния экрана до источника и приемника (жилых домов)	До 10 дБ
Установка акустического экрана с козырьком	Эффект на высоте экрана. На этажах, расположенных выше него, эффекта нет	До 13 дБ
Плотная посадка древесно-кустарниковой растительности в санитарно-защитной зоне	Эффект на высоте деревьев. На этажах, расположенных выше, эффекта нет. Ширина зоны должна быть не менее 10 м	До 13 дБ на 100 м [10]
Обработка зданий и сооружений на территории распространения звука шумопоглощающими материалами	Дополнительные расходы для жителей домов на обработку фасадов	До 27 дБ на каждые 100 дБ уровня шума
Установка систем проветривания с функцией шумозащиты в квартирах	Дополнительные расходы для жителей домов на приобретение фильтров и оплату электроэнергии	До норм СанПиН

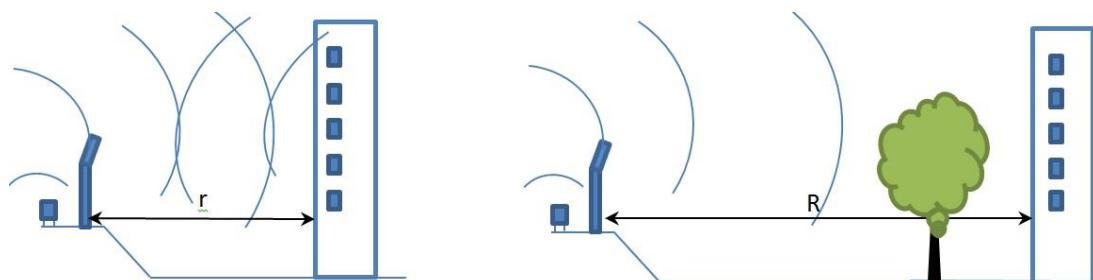


Рис. 3. Расчетные схемы затухания шума от вагонных замедлителей

большой мощности позволит снизить эквивалентные уровни шума на селитебной территории до 20 дБА, а в жилых помещениях – до ПДУ.

Выводы

В результате проведенных измерений были определены спектральные уровни шума, эквивалентные и максимальные уровни шума в процессе вытурмаживания отцепов клещевидными вагонными замедлителями.

Измеренные уровни шума превышают допустимые значения на станции (на среднегеометрических частотах; эквивалентные – 112,3 дБ; максимальные – 117,3 дБ; пиковые – 130,6 дБ) и на территории жилой застройки. Отмечено преоб-

ладание пиковых значений уровней шума на частотах 2 000 и 4 000 Гц, при этом генерация высоких уровней шума не всегда связана с массой вытурмаживаемого отцепа.

На сегодняшний день единственными и в большой степени изученными средствами защиты от шума являются акустические экраны, однако полученные для условий сортировочных станций результаты расчетов затухания шума в расчетной точке на территории жилой застройки свидетельствуют о необходимости корректировки расчетов: на некоторых частотах результаты превышают допустимые по стандарту значения точности расчета ±3 дБ.

Список источников

1. Труд и занятость в России. 2023 : статистический сборник / Росстат. Москва, 2023. 180 с.
2. Преображенская Е. А. Система управления риском развития профессиональной тугоухости у работников горнодобывающей и машиностроительной промышленности : специальность 14.02.04 «Медицина труда» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора медицинских наук / Преображенская Елена Александровна ; Федеральный научный центр гигиены имени Ф. Ф. Эрисмана. Москва, 2013. 48 с.
3. Борцова С. С. Комплексное решение проблемы снижения шума железнодорожного транспорта // Noise Theory and Practice. 2021. № 5 (27). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompleksnoe-reshenie-problemy-snizheniya-shuma-zheleznodorozhnogo-transporta> (дата обращения: 14.12.2024).
4. Maekawa Z. Noise reduction by screens // Applied Acoustics. 1968. No. 1. P. 157–173.
5. Sergeev S., Fleury R., Lissek H. Ultrabroadband sound control with deep-subwavelength plasmacoustic metalayers // Nature Communications. 2023. Vol. 14. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38522-5> (дата обращения: 23.01.2025).
6. Генерация звука при трении скольжения / А. В. Колубаев, Е. А. Колубаев, И. Н. Вагин, О. В. Сизова // Письма в Журнал технической физики. 2005. Т. 31, № 19. С. 6–13.
7. Импортозамещающая технология подавления шума на сортировочных комплексах / В. В. Шаповалов, И. А. Майба, Р. М. Муртазалиев, Р. А. Корниенко // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2016. № 1 (186). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/importozameschayuschaya-tehnologiya-podavleniya-shuma-na-sortirovochnyh-kompleksah> (дата обращения: 30.06.2025).
8. Mikulski J. The First Application of the Electrodynamic Wagon Retarder in Poland // Komunikácie. 2011. URL: <https://doi.org/10.26552/COM.C.2011.2A> (дата обращения: 05.02.2024).
9. Копытенкова О. И., Афанасьева Т. А. Эффективность снижения шума от железнодорожного транспорта акустическими экранами // Гигиена и санитария. 2023. Т. 102, № 8. С. 764–767.
10. Feng J. Untersuchungen des Einflusses von Wald auf die Schallausbreitung : Dissertation ... Doktor der Ingenieurwissenschaften : (Forschungsbericht 2016-11) / Feng J.; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Physik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen. Köln, 2016. 149 s.
11. ГОСТ 23337–2014. Методы измерения шума на селитебной территории и в помещениях жилых и общественных зданий. Москва : Стандартинформ, 2015. 29 с.

References

1. Labour and employment in Russia. 2023: Stat.ssb. Rosstat. Moscow; 2023. 180 c. (In Russ.).
2. Preobrazhenskaya E. A. System of management of risk of development of professional hearing loss in workers of mining and machine-building industry. Abstract of dissertation for the Degree of Doctor of Medical Sciences: 14.02.04 / Preobrazhenskaya E. A.; Moscow; 2013. 48 c. (In Russ.).
3. Bortsova S. S. Complex solution of the problem of railway transport noise reduction. *Noise Theory and Practice*. 2021;(27). (In Russ.). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompleksnoe-reshenie-problemy-snizheniya-shuma-zheleznodorozhnogogo>.
4. Maekawa Z. Noise reduction by screens. *Applied Acoustics*. 1968;(1):157–173.
5. Sergeev S., Fleury R., Lissek H. Ultrabroadband sound control with deep-subwavelength plasmacoustic metalayers. *Nature Communications*. 2023. Vol. 14. URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38522-5>.
6. Kolubaev A. V., Kolubaev E. A., Vagin I. N., Sizova O. V. Sound generation at sliding friction. *Letters to the Journal of Technical Physics*. 2005;31(19):6–13. (In Russ.).
7. Shapovalov Vladimir Vladimirovich, Maiba Igor Albertovich, Murtazaaliev Ruslan Murtazaalievich, Kornienko Roman Andreevich Import-substituting noise suppression technology at sorting complexes. *News of Universities. North Caucasian Region. Series: Technical Sciences*. 2016;(186). (In Russ.). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/importozameschayuschaya-tehnologiya-podavleniya-shuma-na-sortirovochnyh-kompleksah>.
8. Mikulski J. The First Application of the Electrodynamic Wagon Retarder in Poland. *Komunikácie*. 2011. URL: <https://doi.org/10.26552/COM.C.2011.2A>.
9. Kopytenkova O. И., Afanasyeva T. А. Effectiveness of noise reduction from railway transport by acoustic screens. *Hygiene and Sanitation*. 2023;102(8):764–767. (In Russ.).
10. Feng J. Untersuchungen des Einflusses von Wald auf die Schallausbreitung: Dissertation ... Doktor der Ingenieurwissenschaften: (Forschungsbericht 2016-11) / Feng J.; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Physik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen. Köln; 2016. 149 s.
11. GOST 23337–2014. Methods of noise measurement on the residential area and in the premises of residential and public buildings. Moscow: Standardinform; 2015. 29 p. (In Russ.).

Информация об авторе

E. A. Калиниченко – аспирант кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the author

E. A. Kalinichenko – Postgraduate Student of the Life Safety Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 14.05.2025; одобрена после рецензирования 14.06.2025; принята к публикации 30.06.2025.

The article was submitted 14.05.2025; approved after reviewing 14.06.2025; accepted for publication 30.06.2025.

Научная статья
УДК 656.22
doi:10.52170/1815-9265_2025_75_23

Влияние кривых малого радиуса на эксплуатационные показатели работы железнодорожного участка

Павел Сергеевич Холодняк¹, Екатерина Викторовна Пчелинцева^{2✉}

^{1, 2} «ВНИИЖТ», Москва, Россия

¹ holodnyak.pavel@vniizht.ru

² pchelinceva.e@vniizht.ru✉

Аннотация. Кривые малого радиуса, как элемент путевой инфраструктуры, оказывают негативное влияние на стабильное продвижение поездопотоков за счет существенного повышения количества выдаваемых предупреждений об ограничении скорости движения поездов и отказов технических средств. Наиболее значительно это сказывается на пропускной способности Восточного полигона. Кривые малого радиуса также являются источником повышенного износа как элементов верхнего строения пути, так и подвижного состава. Здесь значительно чаще, в сравнении с участками, не имеющими неблагоприятного плана, производятся работы не только по замене остродефектных рельс, но и по сплошной смене плетей бесстыкового пути. Проведение работ также сопровождается выдачей ограничений по уменьшению скорости движения. Кроме того, кривые малого радиуса создают предпосылки для возникновения аварийных ситуаций. Повышенные динамические нагрузки на подвижной состав и инфраструктуру увеличивают риск схода состава с рельсов. А в условиях сложного рельефа и климатических особенностей Восточного полигона (большие перепады температур, участки вечномерзлых грунтов) эти проблемы усугубляются. Вместе с тем при большом штате квалифицированной рабочей силы в настоящее время в Забайкальском крае и Амурской области остается сложной демографическая обстановка.

В данной работе проведен анализ эксплуатационных показателей участков, схожих по параметрам пропущенного тоннажа, но отличных по протяженности кривых малого радиуса, для определения фактического коэффициента надежности транспортного обслуживания участка с кривыми малого радиуса для оценки потенциала дальнейшего роста пропускной способности. Выполненный анализ современного технического состояния и особенностей эксплуатации железнодорожного пути на перегоне Ерофей Павлович – Большая Омутная подтверждает, что в условиях дальнейшего роста объемов перевозок, увеличения количества тяжеловесных и длинносоставных поездов данный участок станет узким местом в обеспечении необходимых параметров пропускной способности Транссибирской магистрали.

По результатам проведенного анализа была проведена экономическая оценка эффективности работ по изменению трассировки участка с неблагоприятными условиями за счет возможной ликвидации кривых малого радиуса, в том числе и за счет сокращения эксплуатационной длины участка Ерофей Павлович – Большая Омутная.

Ключевые слова: кривые малого радиуса, повышение безопасности, трассировка, износ, коэффициент надежности

Для цитирования: Холодняк П. С., Пчелинцева Е. В. Влияние кривых малого радиуса на эксплуатационные показатели работы железнодорожного участка // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 3 (75). С. 23–31. DOI 10.52170/1815-9265_2025_75_23.

Original article

The effect of small radius curves on the operational performance of a railway section

Pavel S. Kholodnyak¹, Ekaterina V. Pchelintseva^{2✉}

^{1, 2} VNIIZHT, Moscow, Russia

¹ holodnyak.pavel@vniizht.ru

² pchelinceva.e@vniizht.ru✉

Abstract. Small-radius curves, as an element of the track infrastructure, have a negative impact on the stable progress of train traffic due to a significant increase in the number of train speed warnings issued and failures of technical means. This has a particularly critical impact on the capacity of the Eastern Landfill. Small-radius curves are also a source of increased wear and tear on both the elements of the track's upper structure and rolling stock.

Here, much more often, in comparison with sites that do not have an unfavorable plan, work is carried out not only to replace severely defective rails, but also to continuously change the weaves of the seamless track. The work is also accompanied by the issuance of restrictions on reducing the speed of movement. In addition, small-radius curves create prerequisites for emergency situations. Increased dynamic loads on rolling stock and infrastructure increase the risk of derailment. And in conditions of difficult terrain and climatic features of the Eastern landfill (large temperature differences, areas of permafrost), these problems are aggravated. If there is a need for a larger staff of qualified labour, the demographic situation in the Trans-Baikal Territory and the Amur Region remains difficult at present.

In this paper, an analysis of the operational performance of sections with similar tonnage parameters, but different in length of small-radius curves, was carried out to determine the actual reliability coefficient of transport services for a section with small-radius curves to assess the potential for further capacity growth. The analysis of the current technical condition and operational features of the railway track on the Erofey Pavlovich – Bolshaya Omutnaya section confirms that in the conditions of further growth in transportation volumes, an increase in the number of heavy and long trains, this section will become a bottleneck in ensuring the necessary parameters of the throughput of the Trans-Siberian Railway.

Based on the results of the analysis, an economic assessment of the work effectiveness to change the routing of the section with unfavourable conditions was carried out due to the possible elimination of small-radius curves, including by reducing the operational length of the Erofey Pavlovich – Bolshaya Omutnaya section.

Keywords: small radius curves, increased safety, tracing, wear, reliability coefficient

For citation: Kholodnyak P. S., Pchelintseva E. V. The effect of small radius curves on the operational performance of a railway section. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(75):23–31. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_75_23.

Введение

Как отмечено в Транспортной стратегии Российской Федерации [1], несмотря на прогноз дальнейшего развития транзитных контейнерных перевозок на направлении Восток – Запад, сохраняется проблема эффективного использования пропускной способности железных дорог [2, 3]. В настоящее время имеется целый спектр инфраструктурных факторов, которые оказывают значительное влияние на штатную работу железнодорожных участков и выполнение нормативного графика движения поездов [4].

Как известно, рост объема перевозок может быть достигнут путем увеличения размеров движения или массы и длины поездов, в том числе за счет возрастания погонных и осевых нагрузок [5]. Однако на некоторых участках Восточного полигона как увеличение количества поездов, так и возможности повышения массы поездов ограничены состоянием инфраструктуры.

Исторически при строительстве Транссиба в конце XIX – начале XX в. на многих участках трасса выбиралась с условием максимально возможного сокращения объема земляных работ [6]. В сложный рельеф местности трассу удавалось вписать только с применением круговых кривых малых радиусов. За прошедшее столетие скорости движения и массы поездов кратно возросли и, как следствие, возросли затраты на содержание пути в таких сложных условиях, а сочетание тяжеловесного движения с замедлением скорости в кривых малого радиуса приводит к увеличению силы воздействия на рельсы,

что ускоряет их износ и требует более частой замены [7].

В данной работе проанализированы наиболее значимые с точки зрения технической надежности инфраструктуры факторы, напрямую влияющие на эксплуатационные показатели продвижения поездопотока на Восточном полигоне. В частности, представлены исследования о влиянии кривых малого радиуса на эксплуатационные показатели работы железнодорожного участка на примере Забайкальской железной дороги [8].

Материалы и методы исследования

Для оценки степени влияния неблагоприятного плана пути на стабильное продвижение поездопотока были проанализированы данные из следующих систем:

1) Комплексная автоматизированная система учета, контроля устранения отказов технических средств и анализа надежности (КАСАНТ) за 2021–2024 гг.;

2) Автоматизированная система «Планирование, учет и анализ проведения “окон” и выполнения хозяйственной работы» на горизонтах годового и месячного планирования «окон» (АС АПВО «Сетевая отчетность») за 2017–2024 гг.;

3) Автоматизированная система выдачи и отмены предупреждений (АСУ ВОП-3) за 2017–2024 гг.;

4) Цифровая прогнозная макромодель движения поездопотоков на сети железных дорог (Эльбрус-М) [9] за 2024 г.

В качестве метода исследования был выбран сравнительный анализ эксплуатационных показателей участков, схожих по параметрам пропущенного тоннажа, но отличных по протяженности кривых малого радиуса (участки Забайкальской железной дороги: Ерофей Павлович – Сегачама – Большая Омутная (основной рассматриваемый участок); Берея – Шимановская (участок-аналог)).

Контрольными параметрами выбраны:

- количество «окон» более 30 мин по всем хозяйствам и их общая продолжительность за 2024 г.;
- продолжительность «окон» для ремонта и текущего содержания пути за 2017–2024 гг.;
- продолжительность «окон» по основным промежуточным видам ремонта за 2017–2024 гг.;
- количество ограничений скорости до 15–25 км/ч за 2017–2024 гг.

Сравнительный анализ проведен для определения коэффициента надежности транспортного обслуживания участка Ерофей Павлович – Большая Омутная, где протяженность кривых малого радиуса составляет более 40 % от общей длины.

Результаты исследования

На начальном этапе исследования были выбраны участки Забайкальской железной дороги, на которых отчетливо прослеживается разительное отличие фактических показателей от запланированных в нормативном графике движения поездов (табл. 1 и 2).

После анализа нормативных графиков и графиков исполненного движения на участке Чернышевск – Могоча в четном направлении выявлено значительное влияние ограничений пропуска по перегонам Ерофей Павлович – Сегачама – Большая Омутная на изменение поездо-часов задержек на всем протяжении от Чернышевска до Уруши, в том числе и по самим техническим станциям Чернышевск и Могоча:

1) при возникновении дополнительных затруднений в продвижении по участку Могоча – Уруша возникает необходимость остановки поездов на станции Могоча, что приведет к дополнительным затратам на простой на данной технической станции до 35 мин;

2) в случае нарушений нормальной работы в границах станции Могоча возникают дополнительные затраты времени на следование по

Таблица 1

Статистические данные работы участка Могоча – Уруша за 2024 г.

Показатель	Нечетное направление			Четное направление		
	Прогноз	Исполнение	Отклонение, %	Прогноз	Исполнение	Отклонение, %
Размеры движения, кол-во поездов	77,7	68,2	-12,3	79,1	70,3	-11,1
Участковая скорость, км/ч	46,7	30,8	-34,1	45,7	28,4	-37,8
Поездо-часы в движении	180 745	210 376	+16,0	186 516	236 344	+27
Поездо-часы стоянок	3 774	34 509	+814,0	5 685	38 781	+582,0

Таблица 2

Статистические данные работы участка Чернышевск – Могоча за 2024 г.

Показатель	Нечетное направление			Четное направление		
	Прогноз	Исполнение	Отклонение, %	Прогноз	Исполнение	Отклонение, %
Размеры движения, кол-во поездов	78,3	67,3	-14,0	78,7	69,4	-11,8
Участковая скорость, км/ч	45,7	29,6	-35,1	43,8	30,1	-31,3
Поездо-часы в движении	166 420	205 698	+23,6	172 554	210 577	+22,0
Поездо-часы стоянок	6 631	24 279	+266,1	9 642	23 894	+148,0

предшествующему станции участку Чернышевск – Могоча из расчета 30 мин на один поезд, что, в свою очередь, может повлечь за собой возникновение дополнительных затрат на стоянку поездов на станции Чернышевск из расчета 25 мин на каждый поезд.

Общие дополнительные затраты времени на продвижение каждого поезда в четном направлении могут составлять 2 ч 10 мин.

При возникновении дополнительных затруднений в продвижении по участку Могоча – Чернышевск возникает необходимость остановки поездов на станции Могоча, что приведет к дополнительным затратам на простой на данной технической станции в размере 30 мин.

В случае нарушений нормальной работы в границах станции Могоча возникают дополнительные затраты времени на следование по предшествующему станции участку Уруша – Могоча из расчета 25 мин на один поезд, что, в свою очередь, может повлечь за собой возникновение дополнительных затрат на стоянку поездов на станции Уруша из расчета 20 мин на каждый поезд.

Общие дополнительные затраты времени на продвижение каждого поезда в нечетном направлении могут составлять 2 ч.

В дальнейшем сравнительный анализ проводился детализировано по участкам: Ерофей Павлович – Большая Омутная и Беряя – Шимановская.

Основными критериями выбора участков для сравнения являлись: длина участка, тип

верхнего строения пути, грузонапряженность в четном и нечетном направлении, пропущенный тоннаж по состоянию на 1 января 2024 г., которые представлены в табл. 3. После изменения трассировки данные участки станут схожими по технологии и периодичности проведения работ по содержанию и ремонту путевой инфраструктуры.

Цель проведения сравнительного анализа – оценка влияния технического состояния участков на эксплуатационные показатели.

Статистические данные о наличии «окон» на рассматриваемых участках за 2024 г. представлены в табл. 4 и 5.

Фактическая продолжительность «окон» для ремонта и текущего содержания устройств инфраструктуры на рассматриваемых участках за исследуемый период была проанализирована отдельно в четном и нечетном направлении. К учету в данном анализе приняты «окна» с фактической продолжительностью более 30 мин, по всем хозяйствам (П, ДРП, НТЭ, Ш, НС, ДКРЭ, ДКРС, ДКСС, сторонние и прочие организации).

Сравнительный анализ данных за восемь лет, представленный в табл. 6, выявил завышение временных затрат по хозяйству пути на содержание инфраструктуры на основном рассматриваемом участке более чем в восемь раз по сравнению с участком-аналогом.

Согласно проведенным исследованиям, основанным на статистических данных, полученных за период с 2017 по 2024 г., сумма времени на проведение работ по содержанию,

Таблица 3

Основные эксплуатационные характеристики рассматриваемого участка и участка-аналога по состоянию на 1 января 2024 г.

Показатель	Рассматриваемый участок (Ерофей Павлович – Большая Омутная)*	Участок-аналог (Беряя – Шимановская)*
1. Грузонапряженность, млн ткм брутто на км	144,8 / 60,9	173,8 / 70,9
2. Год последнего капитального ремонта	2016 / 2016–2017	2017 / 1996
3. Год и вид последнего промежуточного ремонта (П, С, РП, РС)	9,5 км РП в 2022 г. / не проводился	Не проводился / в 2008 г. средний ремонт
4. Нормативная наработка, млн т брутто	1 400 / 1 400	1 400 / 600
5. Пропущенный тоннаж, млн т брутто	936–1 016 / 359–406	1 021 / 1 131
6. Наибольшая допускаемая скорость грузовых поездов, км/ч	60–65 / 60	80 / 80
7. Средняя техническая скорость грузовых поездов, км/ч	39 / 38	41 / 45
8. Количество поездов в сутки (гр.; пасс.; приг.), шт.	75; 4; 2 / 68; 4; 2	90; 6; 0 / 83; 6; 0
9. Длина, км	42,9	22,4
10. Длина после изменения трассировки, км	23,0	22,4

* Числитель – четное направление, знаменатель – нечетное.

Таблица 4

Статические данные о наличии «окон» продолжительностью от 30 мин по всем хозяйствам на участке Ерофей Павлович – Большая Омутная за 2024 г.

Хозяйство	Четный путь		Нечетный путь	
	Кол-во, шт.	Общая продолжительность, ч	Кол-во, шт.	Общая продолжительность, ч
П	182	547,5	15	28,4
ДРП	1	2,0	0	0,0
НТЭ, ДКРЭ	70	181,5	47	101,4
Ш	9	5,1	6	3,8
ДКРС	4	23,5	1	7,8
Прочие	0	0,0	2	1,1
<i>Итого</i>	266	752,2	71	147,9
Пропущенный тоннаж, млн т брутто	1 016		411	

Таблица 5

Статические данные о наличии «окон» продолжительностью от 30 мин по всем хозяйствам на участке Берега – Шимановская за 2024 г.

Хозяйство	Четный путь		Нечетный путь	
	Кол-во, шт.	Общая продолжительность, ч	Кол-во, шт.	Общая продолжительность, ч
П	9	26,4	72	189,9
ДРП	0	0,0	0	0,0
НТЭ, ДКРЭ	15	39,1	15	41,8
Ш	13	21,6	10	16,7
ДКРС	0	0,0	6	14,9
Прочие	0	0,0	0	0,0
<i>Итого</i>	37	87,1	103	263,3
Пропущенный тоннаж, млн т брутто	1 021		1 135	

Таблица 6

Анализ продолжительности «окон» для ремонта и текущего содержания пути на сравниваемых участках за 2017–2024 гг., ч

Год	Текущее содержание пути		Ремонт пути	
	Ерофей Павлович – Большая Омутная	Берега – Шимановская	Ерофей Павлович – Большая Омутная	Берега – Шимановская
2017	67,1	4,9	64,6	0
2018	175,5	24,5	60,9	32,9
2019	183,7	32,2	69,2	0
2020	203,5	27,8	137,7	21,6
2021	244,3	52,4	89,3	9,6
2022	303,7	26,2	104,4	0
2023	447,0	24,3	106,7	1,8
<i>Итого</i>	1 625,0	192,0	633,0	66,0

ремонту и реконструкции путевой инфраструктуры возрастает ежегодно.

В четном, наиболее грузонапряженном, направлении участка Ерофей Павлович – Большая Омутная количество фактически предоставленных «окон» более чем в семь раз превышает количество «окон» на участке-аналоге Берега – Шимановская (266 шт. против 37 шт.), а их общая продолжительность более чем в восемь

раз превышает данный показатель на участке-аналоге (752,2 ч против 87,1 ч), при этом и средняя продолжительность одного «окна» на участке Ерофей Павлович – Большая Омутная на 0,4 ч больше, чем на участке Берега – Шимановская.

Наибольшее количество «окон» и их общая продолжительность на участке Ерофей Павлович – Большая Омутная было предо-

ствлено для ремонта и текущего содержания пути (182 шт. / 547,5 ч), что составляет 68 % по количеству и 73 % по продолжительности от всех предоставленных «окон» на данном участке за рассматриваемый период.

Нечетное направление не является таким показательным по причине того, что на участке Ерофей Павлович – Большая Омутная последний капитальный ремонт был выполнен в 2016–2017 гг. с укладкой бесстыкового пути на железобетонном основании, тогда как на участке Берега – Шимановская капитальный ремонт не выполнялся с 1996 г. и эксплуатировался звеневой путь на деревянном основании с пропущенным тоннажем 1 135 млн т брутто при нормативе 600 млн т брутто, что требовало дополнительных затрат времени на текущее содержание данного участка.

Надежность работы участка-аналога (Берега – Шимановская) находится в рамках допустимых нормативных значений, в связи с чем далее более детально рассматривается влияние ограничений на надежность работы конкретно по участку Ерофей Павлович – Большая Омутная.

С учетом статистических данных о времени, затраченном на текущее содержание и ремонт в 2024 г., а также сведений о назначении капитального ремонта железнодорожного пути с использованием новых материалов

(КРН) на перегоне Ерофей Павлович – Сегачама в 2027 г., а на перегоне Сегачама – Большая Омутная в 2028 г., тренд на изменение суммы времени на ремонт и содержание путевой инфраструктуры на участке Ерофей Павлович – Большая Омутная будет иметь вид, представленный на рис. 1. На рисунке отображены результаты построения экспоненциальной линии данного тренда.

Анализ рис. 1 позволяет предположить, что при текущем варианте содержания пути суммарный годовой период на участке Ерофей Павлович – Большая Омутная, когда будет ограничено движение по данному участку, в 2027 г. составит более 1 400 ч, что эквивалентно ежесуточным потерям 12,8 пар поездов.

На рис. 2 представлен расчетный коэффициент надежности транспортного обслуживания участка Ерофей Павлович – Большая Омутная с учетом выявленного дополнительного бюджета времени на содержание и ремонт пути (+985 ч к технологическим «окнам») за 2020–2024 гг.

Исходя из рассмотренных ограничений и технологии содержания участка с большим количеством кривых малого радиуса определен коэффициент надежности транспортного обслуживания участка Могоча – Уруша за 2024 г. (включающего рассматриваемый участок Ерофей Павлович – Большая Омутная) –

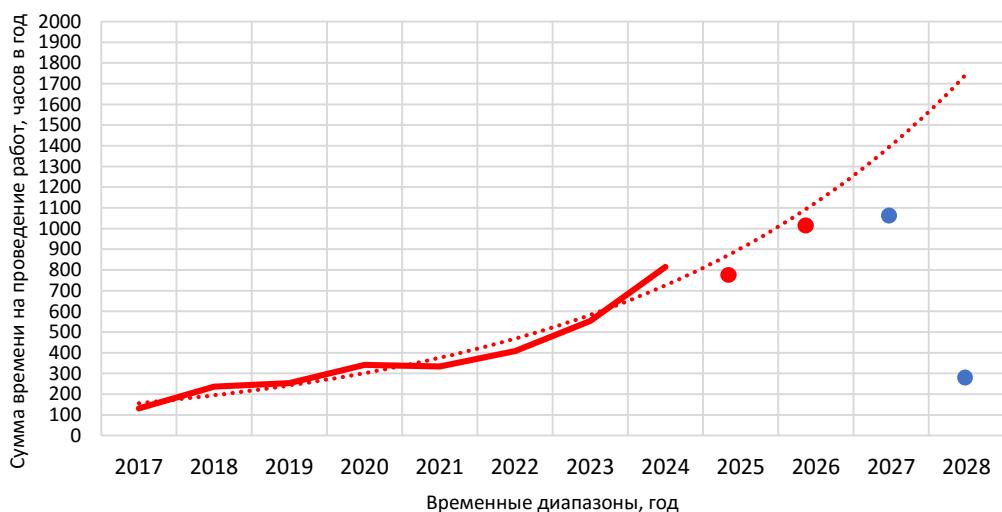


Рис. 1. Сумма времени на проведение работ по содержанию, ремонту, реконструкции путей инфраструктуры: временные диапазоны за 2017 и 2028 гг. учитывают время на текущее содержание и все виды ремонта, включая запланированное проведение КРН; точки – затраты на текущее содержание, а также на проведение запланированного капитального ремонта в 2027–2028 гг.

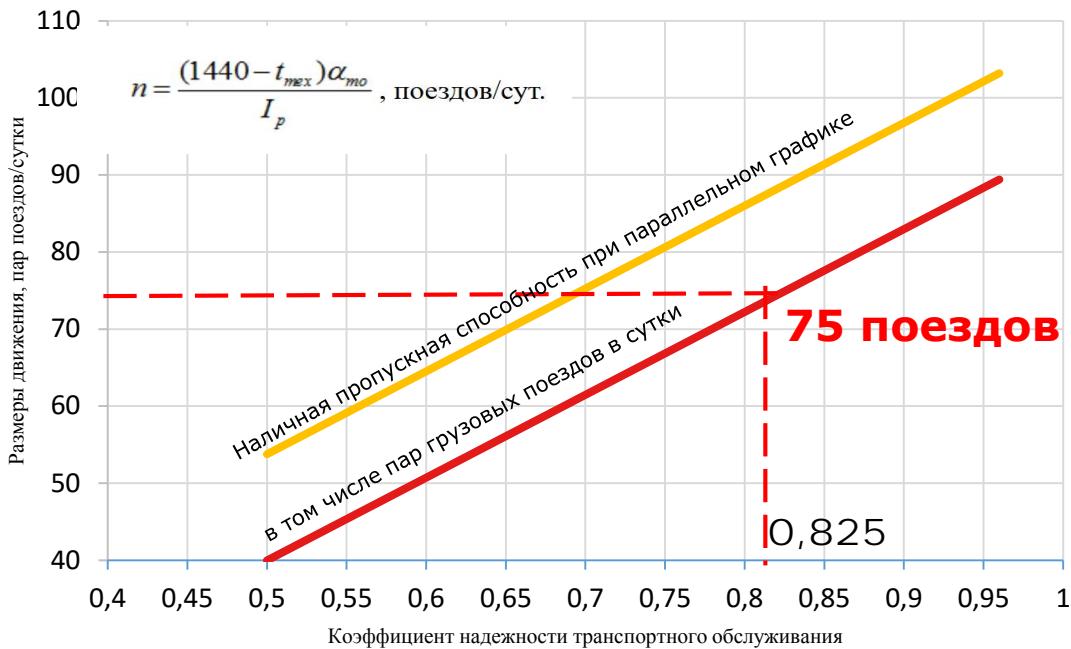


Рис. 2. Графическое определение коэффициента надежности транспортного обслуживания участка Ерофеев Павлович – Большая Омутная (при размерах движения 75 пар поездов)

0,825, а согласно действующей инструкции [10] для двухпутных электрифицированных линий данный коэффициент равен 0,96. С учетом данных рис. 1 при подтверждении тренда увеличения затрат времени на содержание и ремонт путевой инфраструктуры в год проведения КРН коэффициент надежности транспортного обслуживания может снизится до значения 0,74.

Выводы

Фактически на маршруте, где участки идентичны по использованию технических устройств (путь, средства сигнализации и связи по движению поездов, устройства энергоснабжения), возникают прецеденты по выявлению отдельных участков, неспособных обеспечить одинаковый коэффициент надежности транспортного обслуживания для всего маршрута. Это участки с неблагоприятным профилем, в частности имеющие значительную протяженность кривых малого радиуса.

Расчетным путем было определено, что ликвидация кривых малого радиуса на рассматриваемом перегоне Ерофеев Павлович – Большая Омутная позволит в дальнейшем:

- увеличить допускаемую скорость движения, а также техническую и участковую скорости движения поездов;
- увеличить объемы перевозок на направлении за счет повышения уровня надежности

продвижения поездопотока путем сокращения «окон» на содержание и ремонт путевой инфраструктуры, а также сокращения числа случаев обнаружения остродефектных рельсов;

– сократить около 100 тыс. лок.-ч и около 60 тыс. бриг.-ч в год на участке Чернышевск – Могоча – Уруша;

– сократить затраты на содержание и обслуживание пути и земляного полотна в связи с ликвидацией кривых малого радиуса и сокращением протяженности пути;

– сократить текущие затраты на содержание устройств автоматики, телемеханики и контактной сети, на обслуживание электроповозов, исключить дефектные ИССО, требующие ремонта;

– повысить безопасность движения за счет сокращения отказов технических средств 1-й и 2-й категории, а также потенциальных случаев сходов и крушений;

– сократить количество отставленных от движения поездов по причинам отказов технических средств, временного снижения пропускной способности из-за выдачи «окон», снижение количества ограничений;

– достичь иных социальных и экономических эффектов.

Срок реализации проекта и распределения инвестиций составляет пять лет, при этом

строительство новой трассы будет проводиться параллельно существующей линии и не повлечет за собой длительного закрытия участка Транссибирской магистрали.

Проведение технико-экономической оценки реализации проектного решения по рекон-

струкции участка Ерофей Павлович – Большая Омутная Забайкальской железной дороги показывает, что при обеспечении дополнительных объемов перевозок в размере трех пар поездов проект становится экономически эффективным.

Список источников

1. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозами на период до 2035 года. Москва, 2001. 285 с.
2. Виноградов С. А. Мы создаем сегодня то, что будет востребовано железной дорогой и обществом завтра // Вестник Института проблем естественных монополий. Техника железнодорожных дорог. 2024. № 1 (65). С. 9.
3. Сотников Е. А., Шенфельд К. П. Неравномерность грузовых перевозок в современных условиях и ее влияние на потребную пропускную способность участков // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2021. № 5. С. 3.
4. Певзнер В. О., Ромен Ю. С. Основы разработки нормативов содержания пути и установления скоростей движения : монография. Москва : Куна, 2024. 308 с.
5. Методические положения по определению значений основных параметров условий организации перевозочного процесса при внедрении вагонов с повышенной осевой и погонной нагрузкой / М. И. Мехедов, Е. А. Сотников, П. С. Холодняк [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 4. С. 359.
6. Лоскутов С. А. Великая магистраль на Восток: начало Транссиба // Вестник Челябинского государственного университета. 2003. № 1 (2). С. 158.
7. Основные причины повышенного износа рельсов и гребней колесных пар грузовых вагонов / Л. А. Мугинштейн, В. М. Богданов, А. В. Сухов, Ю. С. Ромен // Железнодорожный транспорт. 2020. № 7. С. 43.
8. О подходах к обоснованию целесообразности изменения геометрии трассы со сложным планом железнодорожных линий / М. И. Мехедов, В. А. Антонец, В. А. Устинов, В. Г. Федулин // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2025. Т. 84, № 1. С. 60.
9. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 202444376. Комплексный расчет параметров продвижения поездопотока для определения причин невыполнения скорости и выявления их влияния на качество выполнения прогнозных параметров (ЭЛЬБРУС-М (Очередь 2023 г.)) : № 2024663549 : заявл. 14.06.2024 : опубл. 24.06.2024 / Анфиногенов А. Ю., Капустин Н. А., Кирякин В. Ю., Клюев Н. А., Кокляев М. В., Коркин К. Е., Лежава В. Ш., Ляшко О. В., Мугинштейн Л. А., Понарин Л. Н., Рябцева Е. Ю., Хрусталев Д. Ф., Шубин А. Ю., Лобанов С. В., Мехедов М. И.
10. Инструкция по расчету пропускной и провозной способностей железных дорог ОАО «РЖД». Москва, 2022. 364 с.

References

1. Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with forecasts for the period up to 2035: official text. Moscow; 2001. 285 p. (In Russ.).
2. Vinogradov S. A. We are creating today what will be in demand by the railway and society tomorrow. *Bulletin of the Institute of Problems of Natural Monopolies: Railway Technology*. 2024;(65):9. (In Russ.).
3. Sotnikov E. A., Schoenfeld K. P. The unevenness of freight transportation in modern conditions and its impact on the required capacity of sections. *Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport*. 2021;(5):3. (In Russ.).
4. Pevzner V. O., Romain Yu. S. Fundamentals of the development of standards for track maintenance and speed control. Monograph. Moscow: Kuna; 2024. 308 p. (In Russ.).
5. Mekhedov M. I., Sotnikov E. A., Kholodnyak P. S., Kapyrin A. A., Kornienko N. V. Methodological guidelines for determining the values of the main parameters of the conditions for organizing the transportation process when introducing wagons with increased axial and linear loads. *Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport*. 2022;81(4):359. (In Russ.).
6. Loskutov S.A. The Great Highway to the East: the beginning of the Trans-Siberian Railway. *Bulletin of the Chelyabinsk State University*. 2003;(2):158. (In Russ.).
7. Muginstein L. A., Bogdanov V. M., Sukhov A. V., Romain Yu. S. The main causes of increased wear of rails and ridges of wheel sets of freight wagons. *Railway Transport*. 2020;(7):43. (In Russ.).

8. Mekhedov M. I., Antonets V. A., Ustinov V. A., Fedulin V. G. On approaches to substantiating the expediency of changing the geometry of a route with a complex plan of railway lines. *Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport*. 2025;84(1):60. (In Russ.).
9. Anfinogenov A. Yu., Kapustin N. A., Kiryakin V. Yu., Klyuev N. A., Koklyaev M. V., Korkin K. E., Lezhava V. Sh., Lyashko O. V., Muginstein L. A., Ponarin L. N., Ryabtseva E. Yu., Khrustalev D. F., Shubin A. Yu., Lobanov S. V., Mekhedov M. I. Complex calculation of train traffic advancement parameters to determine the causes of speed failure and identify their impact on the quality of forecast parameters (ELBRUS-M (Turn 2023). Computer program registration certificate RU 202444376, 24.06.2024. Application No. 2024663549 dated 14.06.2024. (In Russ.).
10. Instructions for calculating the throughput and carrying capacity of railways of Russian Railways. Moscow; 2022. 364 p. (In Russ.).

Информация об авторах

П. С. Холодняк – аспирант, начальник отдела полигонных технологий и повышения провозной способности сети Центра цифровой модели перевозок и технологии энергосбережения АО «ВНИИЖТ».

Е. В. Пчелинцева – аспирант, ведущий инженер отдела полигонных технологий и повышения провозной способности сети Центра цифровой модели перевозок и технологии энергосбережения АО «ВНИИЖТ».

Information about the authors

P. S. Kholodnyak – Postgraduate Student, Head of the Landfill Technologies and Capacity Enhancement of the network Department, Center of Digital Transportation Model and Energy Saving Technology, VNIIZHT.

E. V. Pchelintseva – Postgraduate Student, a leading engineer of the Landfill technologies and Capacity Enhancement of the network Department, Center of Digital Transportation Model and Energy Saving Technology, VNIIZHT.

Статья поступила в редакцию 30.05.2025; одобрена после рецензирования 30.06.2025; принятая к публикации 21.08.2025.

The article was submitted 30.05.2025; approved after reviewing 30.06.2025; accepted for publication 21.08.2025.

Научная статья
УДК 624.139
doi:10.52170/1815-9265_2025_75_32

Результаты масштабного моделирования морозного пучения грунтов при термостабилизации сезонно-действующими охлаждающими устройствами

Денис Алексеевич Разуваев^{1✉}, Евгений Самуилович Ашпиз², Егор Игоревич Нагаев³

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

²Российский университет транспорта, Москва, Россия

¹ razdenis@mail.ru✉

² geonika@inbox.ru

³ einagaev@mail.ru

Аннотация. Процесс термостабилизации оттаявших многолетне-мерзлых грунтов оснований сезонно-действующими охлаждающими устройствами (СОУ) может занимать значительное время (до нескольких лет), что в определенных грунтово-гидрологических условиях приводит к морозному пучению грунтов основания с достаточно продолжительным периодом проявления пучин на железнодорожном пути. В этом случае при проектировании термостабилизации основания земляного полотна железнодорожного пути СОУ рекомендуется выполнять количественную оценку указанных деформаций и принимать компенсирующие проектные решения.

В работе поставлен и проведен масштабный лабораторный эксперимент по моделированию термостабилизации грунтов сезонно-действующими охлаждающими устройствами для определения эмпирических зависимостей величины морозного пучения глинистых грунтов от их вида и скорости промораживания. Эксперимент состоял из отдельных опытов, каждый из которых заключался в термостабилизации (промораживании) грунтового массива в лотке СОУ при заданной температуре в климатической камере.

По результатам эксперимента отмечено существенное по величине морозное пучение грунтового массива при его термостабилизации СОУ. Получена эмпирическая зависимость величины объемного коэффициента морозного пучения глинистых грунтов с числом пластичности I_p от 5 до 14 от радиальной скорости промерзания у СОУ. Установлено, что при открытой системе промерзания с минимальным путем миграции грунтовых вод к фронту промерзания у СОУ число пластичности глинистых грунтов (в интервале от 5 до 14) является мало влияющим на значения морозного пучения фактором, которым при расчетах можно пренебречь. Полученную зависимость рекомендуется использовать при проектировании термостабилизации основания земляного полотна в районах распространения многолетне-мерзлых грунтов для количественной оценки возможных последующих деформаций морозного пучения и принятия компенсирующих проектных решений.

Ключевые слова: земляное полотно, грунты основания, многолетне-мерзлые грунты, термостабилизация грунтов, сезонно-действующие охлаждающие устройства

Финансирование: масштабная лабораторная установка для эксперимента создана при финансовой поддержке гранта ОАО «РЖД» по договору № 5106471 от 28.12.2022; исследование завершено при финансовой поддержке гранта № 075-15-2024-559 от 25.04.2024 в рамках соглашения с Министерством науки и образования Российской Федерации.

Для цитирования: Разуваев Д. А., Ашпиз Е. С., Нагаев Е. И. Результаты масштабного моделирования морозного пучения грунтов при термостабилизации сезонно-действующими охлаждающими устройствами // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 3 (75). С. 32–41. DOI 10.52170/1815-9265_2025_75_32.

Original article

Results of large-scale modeling of frost heaving in soils during thermostabilization with seasonally-operating cooling devices

Denis A. Razuvayev^{1✉}, Evgeny S. Ashpiz², Egor I. Nagayev³

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

²Russian University of Transport, Moscow, Russia

¹ razdenis@mail.ru✉

² geonika@inbox.ru

³ einagaev@mail.ru

Abstract. The process of thermostabilization of thawed permafrost soils using seasonally-operating cooling devices can take a significant amount of time (up to several years). In certain soil and hydrological conditions, this leads to frost heaving of the subgrade foundation with a fairly long period of heave manifestation on the railway track.

This paper describes a large-scale laboratory experiment conducted to model the thermostabilization of soils with seasonally-operating cooling devices. The purpose was to determine the empirical relationships between the magnitude of frost heaving in clay soils and their type and freezing rate.

The experiment results show significant frost heaving of the soil mass during its thermostabilization by seasonal cooling devices. An empirical relationship was obtained for the volumetric frost heaving coefficient of clay soils with a plasticity index from 5 to 14, as a function of the radial freezing rate near the cooling device. This relationship is recommended for use in designing the thermostabilization of railway subgrade foundations in permafrost regions to quantitatively assess potential subsequent frost heaving deformations and to adopt compensating design solutions.

Keywords: railway subgrade, foundation soils, permafrost, soil thermostabilization, seasonally-operating cooling devices

Funding: scale laboratory experiment installation made with the financial support of a Russian Railways grant under Agreement No.5106471 dated 28.12.2022; research was completed with the financial support of a grant No.075 – 15 – 2024 – 559 dated 25.04.2024 under the Agreement with the Ministry of Science and Education of the Russian Federation.

For citation: Razuvayev D. A., Ashpiz E. S., Nagaev E. I. Results of large-scale modeling of frost heaving in soils during thermostabilization with seasonally-operating cooling devices. *The Siberian Transport University Bulletin.* 2025;(75):32–41. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_75_32.

Введение

Активное освоение богатых полезными ископаемыми территорий нашей страны в XX в. способствовало строительству и развитию железнодорожной сети в условиях распространения многолетне-мерзлых грунтов (ММГ) в основаниях. В этот период развивалась Транссибирская магистраль на Восточном полигоне, была построена Байкало-Амурская магистраль, проложены магистрали на севере Тюменской области и в Арктической зоне страны [1].

При этом в период эксплуатации построенных магистралей наблюдалась деградация многолетне-мерзлых грунтов основания, вызванная как антропогенным воздействием, так и изменением климатических условий [2, 3]. Для минимизации сопутствующих криогенных деформаций в нашей стране [4, 5] и за рубежом [6, 7] разработаны и опробованы различные способы термостабилизации грунтовых массивов, в том числе с применением сезонно-действующих охлаждающих устройств (СОУ).

Несмотря на явные преимущества применения СОУ как энергонезависимого способа термостабилизации, процесс замораживания оттаявших грунтов основания требует значительного времени (до нескольких лет), что в определенных грунтово-гидрологических условиях приводит к морозному пучению грунтов основания при термостабилизации [8] с достаточно продолжительным по времени проявлением пучин на железнодорожном пути. Поэтому при проектировании термостабилизации основания земляного полотна железнодорожного пути

СОУ рекомендуется выполнять количественную оценку указанных деформаций и принимать компенсирующие проектные решения.

Известно, что величина морозного пучения грунтов зависит как от исходных грунтово-гидрологических условий, так и от параметров промерзания, главным образом от скорости промерзания [9, 10]. И если исходные грунтово-гидрологические условия при термостабилизации регулировать не представляется возможным, то выполнять подбор режима промораживания грунтов оснований с помощью современных СОУ, путем изменения их мощности и шага расстановки, вполне осуществимо. В этом ключе научные исследования процесса морозного пучения при термостабилизации грунтов основания СОУ приобретают существенную актуальность.

Настоящая работа посвящена масштабному лабораторному эксперименту по моделированию термостабилизации грунтов сезонно-действующими охлаждающими устройствами для определения эмпирических зависимостей величины морозного пучения глинистых грунтов от их вида и радиальной скорости промораживания.

Материалы и методы исследования

Для масштабного лабораторного эксперимента использована климатическая камера общим объемом 8 м³, в которой смонтирован лоток с грунтовым массивом и установленным в него СОУ. Лоток выполнен из металлической трубы диаметром 530 мм с герметичным дном и подвижным штампом на поверхности грунтового массива. Грунтовый массив промора-

живался парожидкостным СОУ, заполненным хладагентом R410A, с диаметром 38 мм и длинами испарительной и конденсаторной частей по 1,0 м. Эксперимент поставлен с масштабным коэффициентом 1,0 на лабораторной установке, использованной в [11] и усовершенствованной в части установки дополнительных кос контрольных температурных датчиков, а также применения специальных шупов для уточнения формы зоны промерзания. Параметры эксперимента подбирались для наиболее распространенных условий эксплуатации участков земляного полотна железных дорог в криолитозоне, с характерным ложем протаивания ММГ, сложенным водонасыщенными глинистыми грунтами [12].

Принципиальная схема лабораторной установки представлена на рис. 1. В лабораторном эксперименте моделировались три основные температурные зоны (выделены на схеме пунктирными линиями), которые установка позволяла регулировать и контролировать. В первой температурной зоне располагался грунтовый массив 1, который перед началом опыта термостатировался до температуры $+3^{\circ}\text{C}$, что моде-

лирует в первом приближении ложе протаивания ММГ в основании земляного полотна железных дорог в криолитозоне. Во время проведения опыта данная температура поддерживалась корпусом лотка 2, на все открытые поверхности которого и штамп 3 монтировались электрические теплоэлементы и слои теплоизоляции из вспененного полиэтилена общей мощностью 30 мм. С помощью ПК, специального контроллера 4 и температурных датчиков на корпусе лотка под теплоизоляцией поддерживалась постоянная температура на внешних границах грунтового массива.

Для моделирования влажностного режима, характерного для ложа протаивания ММГ в основании земляного полотна, грунт предварительно водонасыщался из мерного сосуда 7 через установленные на дно лотка фильтрующий элемент 5 и песчаный слой 6. До проведения опытов грунт доводился до полного водонасыщения (уровень воды в мерном сосуде соответствовал уровню поверхности грунтового массива и был статичен), в процессе проведения опытов, по мере миграции воды в зону промерзания, уровень

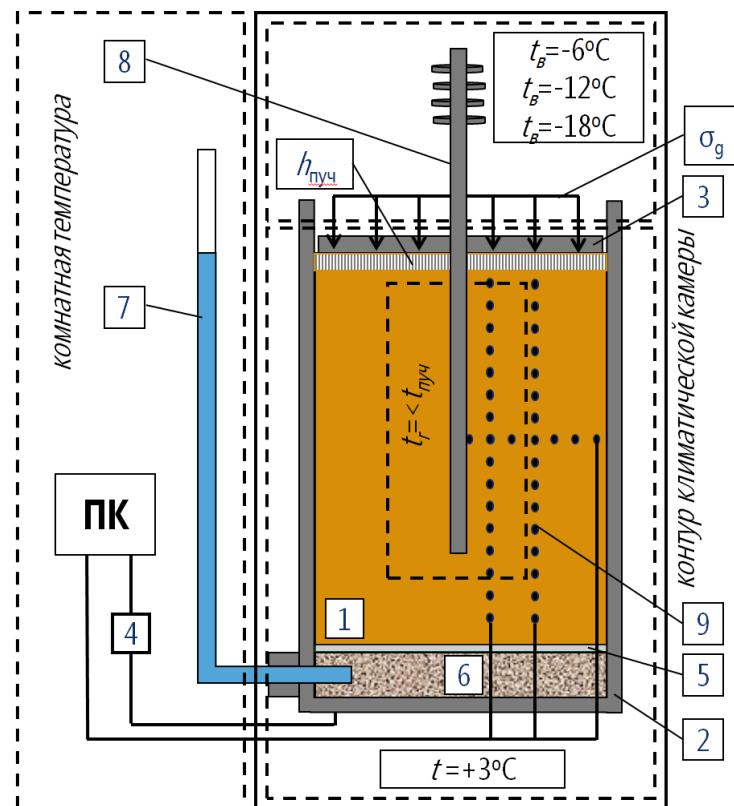


Рис. 1. Принципиальная схема лабораторной установки:
1 – грунтовый массив; 2 – лоток; 3 – штамп; 4 – контроллер; 5 – фильтрующий элемент;
6 – песчаный слой; 7 – мерный сосуд с водой; 8 – конденсаторная часть СОУ;
9 – косы температурных датчиков

воды в мерном сосуде поддерживался с фиксированием расхода.

Во второй температурной зоне находилась конденсаторная часть установленного СОУ 8. Здесь моделировалось взаимодействие СОУ с атмосферным воздухом. Отрицательная температура формировалась холодильным агрегатом климатической камеры. Исходя из основной задачи эксперимента в грунтовом массиве было необходимо обеспечить максимальную вариацию скоростей его промерзания. Поэтому в климатической камере формировалась минимально возможная для используемого холодильного агрегата отрицательная температура на момент проведения опытов, максимально возможная отрицательная температура исходя из возможности работы СОУ в условиях эксперимента, а также промежуточные значения. Следует отметить, что принимаемые в эксперименте температурные режимы работы конденсаторной части СОУ в абсолютных значениях температуры весьма условны, поскольку не учитывался периодический ветровой поток, неизбежно формируемый холодильным агрегатом.

Третья температурная зона формировалась в грунтовом массиве при его замораживании СОУ. Поскольку исследовались процессы морозного пучения, зона ограничивалась изотермой по температуре начала интенсивного морозного пучения $t_f = t_{\text{пуч}}$ в глинистых грунтах при открытой системе промерзания, установленной в [13]. Для контроля температуры в грунтовый массив закладывались одна горизонтальная и две вертикальных косы температурных датчиков 9. Шаг датчиков вертикальных кос – 5 см, горизонтальных – 2,5 см. Данные с температурных датчиков выводились и записывались на ПК. Для дополнительного контроля формы зоны промерзания в процессе проведения опытов применялись специальные стальные щупы, погружаемые в грунтовый массив через отверстия, заранее просверленные в корпусе лотка (с боковой поверхности и в штампе).

Вне климатической камеры сохранялась комнатная температура (четвертая температурная зона). Вне камеры размещался мерный сосуд 7, заполненный водой, а также вычислительные компоненты измерительной аппаратуры.

Поскольку моделировалось промерзание основания существующего земляного полотна, в грунтовом массиве имитировалось

бытовое давление σ_g . Нагрузка формировалась от реактивной балки, закрепленной над лотком, через три тарированные пружины (динамометры) и регулировочные болты. Бытовое давление имитировалось сжатием тарированных пружин регулировочными болтами до значений, соответствующих давлению в основании ложа промываивания железнодорожной насыпи в криолитозоне усредненной высоты [12]. В период проведения опытов, при пучении грунтового массива, бытовое давление поддерживалось на уровне исходных значений регулировочными болтами.

В рамках проведения эксперимента было выдвинуто предположение, что при многорядном размещении СОУ изменение объема грунтового массива в зоне его действия реализуется только в виде вертикальной деформации в сторону наименьшего сопротивления (дневной поверхности). В испытательном лотке этот характер деформирования при пучении обеспечивался жестким дном и боковыми стенками, а также подвижным штампом сверху. Увеличение объема грунтового массива в зоне промерзания приводит к пластическим деформациям окружающего водонасыщенного грунта и вертикальным деформациям штампа 3. Также предполагалось, что полностью водонасыщенный грунт в процессе проведения опытов не уплотняется. Величина вертикальных перемещений штампа $h_{\text{пуч}}$ фиксировалась тремя индикаторами часового типа.

Матрица проведения масштабного лабораторного эксперимента представлена в табл. 1. Первая цифра в обозначении опыта указывает на номер серии опытов, вторая – на номер опыта в серии. В рамках одной серии опытов грунт в лотке не менялся, при этом после каждого опыта грунтовый массив оттаивали при комнатной температуре, а затем терmostатировали и консолидировали перед следующим испытанием.

Основные элементы собранной экспериментальной установки представлены на рис. 2.

Каждый опыт заключался в термостабилизации (промораживании) грунтового массива в лотке сезонно-действующим охлаждающим устройством при заданной температуре в климатической камере. В процессе проведения опытов непрерывно, с частотой 5 мин фиксировалась и записывалась в файл на ПК температура t_f с датчиков горизонтальной косы (10 датчиков с шагом 25 мм). Горизонтальная термо-

Таблица 1

Матрица масштабного лабораторного эксперимента

Температура в климатической камере, °C	Грунтовые условия		
	Супесь ($I_p = 0,06$)	Суглинок легкий ($I_p = 0,11$)	Суглинок тяжелый ($I_p = 0,14$)
- 6,0	Опыт 1.1	Опыт 2.1	Опыт 3.1
- 12,0	Опыт 1.2	Опыт 2.2	Опыт 3.2
- 18,0	Опыт 1.3	Опыт 2.3	Опыт 3.3

Примечание. Перед опытами достигалась степень водонасыщения грунтов $S_r > 0,8$, грунтовый массив и элементы лабораторной установки термостатировались до температуры +3 °C, грунтовый массив консолидировался при бытовом давлении $\sigma_g = 110$ кПа.

a)



б)



в)



Рис. 2. Основные элементы экспериментальной установки:

а – общий вид лотка с грунтом, СОУ, и реактивной балкой; б – тарированная пружина (динамометр) с регулировочным винтом; в – общий вид штампа с теплоизоляцией и индикаторами часового типа

метрическая коса располагалась радиально от СОУ к боковой стенке лотка. Первый датчик находился в непосредственной близости к СОУ (расстояние от СОУ принято $r_{\min} = 0$ см), последний – на расстоянии $r_{\max} = 22,5$ см от СОУ.

После промораживания и стабилизации температурного поля в грунтовом массиве каждого опыта обрабатывались и определялись средние радиальные скорости V_{fr}^i V_{fr}^j промерзания (по изотерме $t_{пуч}$) грунтового массива на участках между датчиками

(от r_i до $r_i + 2,5$ см по схеме на рис. 3). При этом грунтовый массив между датчиками промерзал за время ΔT_i .

Форма промерзшего массива грунта контролировалась вертикальными термометрическими косами и стальными щупами. Для облегчения дальнейшей обработки форма промерзшего грунтового массива упрощалась до вертикального цилиндра с полусферами на торцах. При этом, как показали опытные данные, скорость промерзания по всем направле-

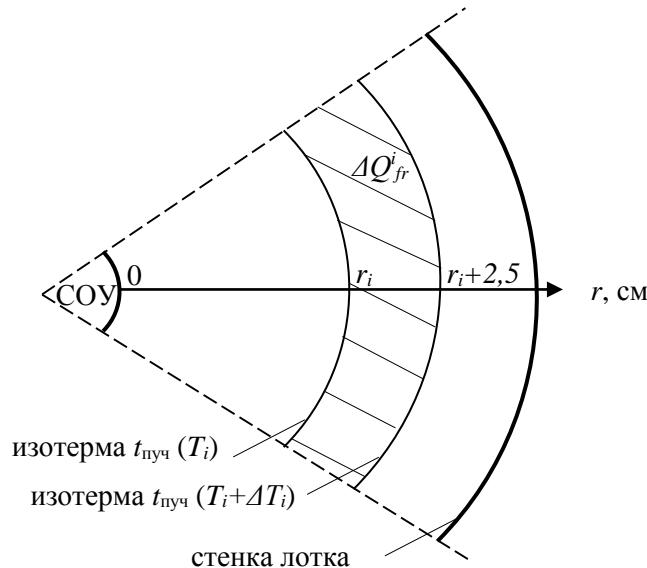


Рис. 3. Схема для обработки опытных данных

ниям, нормальным к поверхности промерзающего массива грунта, в первом приближении равнялась средней радиальной V_{fr} .

За то же время $ΔT_i$ геометрический объем зоны промерзания (по изотерме $t_{пуч}$) грунтового массива увеличивался на величину $ΔQ_{пуч}^i$, значение которой определялось исходя из ранее принятой упрощенной формы промерзающего массива грунта.

Приращение объема грунтового массива $ΔQ_{пуч}^i$ в зоне промерзания (по изотерме $t_{пуч}$), обусловленного морозным пучением, определялось по величине вертикального перемещения штампа $h_{пуч}^i$ (за время $ΔT_i$).

Для решения поставленной задачи и определения эмпирических зависимостей величины морозного пучения глинистых грунтов от их вида и радиальной скорости промерзания при термостабилизации СОУ введена специальная характеристика – объемный коэффициент пучения $ξ_V$.

Объемный коэффициент пучения за время промерзания $ΔT_i$ грунтового массива на участках между датчиками (от r_i до $r_i + 2,5$ см) определялся как

$$ξ_V^i = ΔQ_{пуч}^i / ΔQ_{fr}^i. \quad (1)$$

По результатам проведения каждой серии из трех опытов для определенного вида грунта получали массивы точек средних радиальных скоростей V_{fr}^i промерзания и соответствующих им объемных коэффициентов пучения $ξ_V^i$. Вариацию экспериментальных точек обеспечивало

удаление зоны промерзания от СОУ в процессе опыта, с соответствующим снижением плотности теплового потока и, как следствие, скорости промерзания, а также изменение температуры в климатической камере в серии опытов, что также приводило к изменению скорости промерзания. Последующая обработка массивов точек позволила выделить зависимости величины морозного пучения глинистых грунтов от их вида и радиальной скорости промерзания при термостабилизации СОУ.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты проведения масштабного лабораторного эксперимента по моделированию термостабилизации грунтов сезонно-действующими охлаждающими устройствами показали, что значения средних радиальных скоростей V_{fr}^i промерзания грунтового массива существенно зависят от расстояния до СОУ (табл. 2). В рамках эксперимента значения средней радиальной скорости промерзания, в зависимости от расстояния до СОУ и температуры в климатической камере, изменялись в пределах от 0,16 до 3,06 см/сут. Из общей обработки исключены данные при расстоянии до СОУ до 2,5 см, поскольку в данной зоне существенную погрешность в измерении скорости дает ее значительная величина, а также размер и положение датчиков температуры. При этом отследить величину морозного пучения при промерзании грунтового массива радиусом до 2,5 см от СОУ в рамках поставленного эксперимента затруднительно,

поскольку деформации при высоких скоростях промерзания незначительны и перераспределяются в окружающем массиве.

Как видно из табл. 2, при условном температурном режиме -18°C вокруг СОУ сформировался массив мерзлого грунта радиусом не менее 15 см. При температурных режимах -12 и -6°C радиус массива мерзлого грунта вокруг СОУ составил не менее 12,5 и 7,5 см соответственно.

Результаты определения эмпирических зависимостей величины объемного коэффициента морозного пучения глинистых грунтов от их вида и радиальной скорости промерзания при термостабилизации грунтовых массивов СОУ представлены на рис. 4.

Анализ результатов (см. рис. 4) показывает, что вид глинистого грунта не оказал существен-

ного влияния на значения объемного коэффициента морозного пучения в условиях проведения эксперимента. Это можно объяснить тем, что до проведения опытов грунт доводился до полного водонасыщения (моделировался влажностный режим, характерный для ложа протаивания ММГ в основании земляного полотна), а во время проведения опытов доступ воды в зону промерзания был практически неограничен. По факту моделировалась открытая система промерзания с минимальным путем миграции грунтовых вод к фронту промерзания, для которой установлено, что глинистые грунты с числом пластичности I_p от 5 до 14 дают близкие результаты по значениям морозного пучения при промерзании.

На основании этого все полученные экспериментальные данные (см. рис. 4) аппрокси-

Средние радиальные скорости промерзания грунтового массива при проведении эксперимента

Номер опыта	Средняя радиальная скорость V_{fr} промерзания грунтового массива, см/сут, при расстоянии до СОУ, см				
	2,5–5,0	5,0–7,5	7,5–10,0	10,0–12,5	12,5–15,0
1.1	2,40	0,62	—	—	—
1.2	2,50	1,28	0,45	0,25	—
1.3	2,87	1,60	0,51	0,48	0,28
2.1	2,25	0,52	—	—	—
2.2	2,58	1,62	0,41	0,31	—
2.3	3,06	1,51	0,68	0,57	0,22
3.1	2,53	0,24	—	—	—
3.2	2,36	1,52	0,57	0,16	—
3.3	2,49	1,81	0,89	0,45	0,36

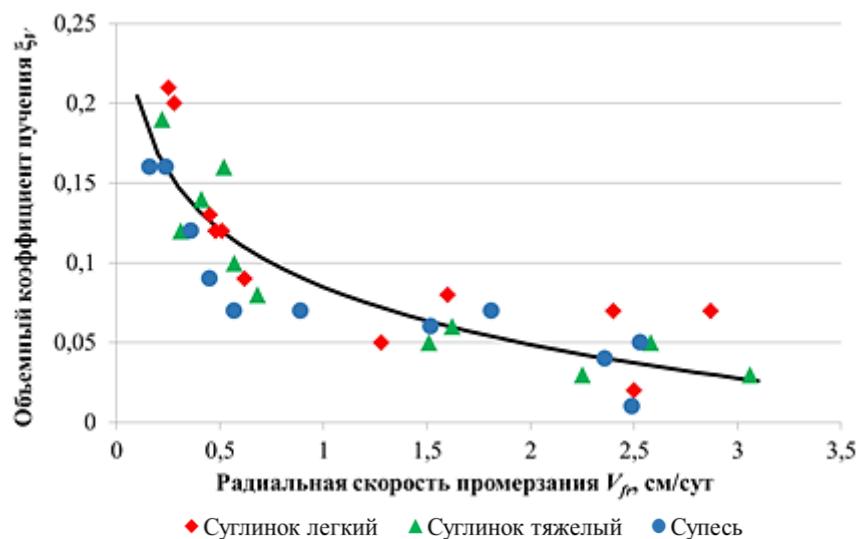


Рис. 4. Зависимость объемного коэффициента морозного пучения от радиальной скорости промерзания при термостабилизации СОУ

мировались совместно. С наибольшей степенью достоверности аппроксимации (0,78) зависимость объемного коэффициента морозного пучения от радиальной скорости промерзания при термостабилизации СОУ в исследуемом диапазоне граничных условий описывается логарифмической функцией:

$$\xi_v^i = -0,052 \ln(V_{fr}) + 0,0848. \quad (2)$$

В исследуемом диапазоне скоростей промерзания значения объемного коэффициента морозного пучения при промораживании грунтового массива СОУ изменялись от 0,01 до 0,22 д. е., что имеет существенное значение и требует учета при проектировании термостабилизации. В целом результаты выполненного лабораторного эксперимента согласуются с другими исследованиями зависимости величины морозного пучения глинистых грунтов от скорости промерзания [9].

Выводы

По результатам проведенного масштабного лабораторного эксперимента по моделированию термостабилизации глинистых грунтов основания земляного полотна СОУ отмечено существенное по величине морозное пучение грунтового массива. При отсутствии возможности реализации пучения грунтового

массива вниз и вбок (например, при многорядном размещении СОУ) деформации направлены в сторону дневной поверхности и могут приводить к расстройствам верхнего и нижнего строения железнодорожного пути.

Получена эмпирическая зависимость величины объемного коэффициента морозного пучения глинистых грунтов с числом пластичности I_p от 5 до 14 от радиальной скорости промерзания у СОУ. Зависимость рекомендуется использовать при проектировании термостабилизации основания земляного полотна в районах распространения ММГ для количественной оценки возможных последующих деформаций морозного пучения и принятия компенсирующих проектных решений. Представляется возможным выполнять подбор режима (скорости) промораживания грунтов оснований с помощью современных СОУ, путем изменения их мощности и шага расстановки.

Установлено, что при открытой системе промерзания с минимальным путем миграции грунтовых вод к фронту промерзания (режим, характерный для ложа протаивания ММГ в основании земляного полотна) число пластичности глинистых грунтов является мало влияющим на значения морозного пучения фактором, которым при расчетах можно пренебречь.

Список источников

1. Ашпиз Е. С. Опыт сооружения земляного полотна железных дорог, расположенных на многолетнемерзлых грунтах: проблемы и пути их решения // Бюллетень Объединенного научного совета ОАО «РЖД». 2019. № 1. С. 21–27. EDN TQJHVX.
2. Сазонов В. Н., Ашпиз Е. С. Актуальные проблемы обеспечения надежности земляного полотна на Восточном полигоне // Железнодорожный транспорт. 2015. № 9. С. 28–31.
3. Ensuring the operational suitability of buildings, railways and bridges in of the Arctic zone in conditions of global warming / I. Sakharov, S. Kudryavtsev, V. Paramonov [et al.] // X International Scientific Siberian Transport Forum – TransSiberia 2022, Novosibirsk, 02–05 марта 2022 года. Novosibirsk : Elsevier B. V., 2022. P. 2506–2514. DOI 10.1016/j.trpro.2022.06.288. EDN GXCWVQ.
4. Цернант А. А. Инновационные технологии управления температурой грунтовых массивов транспортных сооружений в арктических широтах // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2013. № 3 (170). С. 26–31. EDN SXLQXD.
5. Колосков Г. В., Ибрагимов Э. В., Гамзаев Р. Г. К вопросу выбора оптимальных систем термостабилизации грунтов при строительстве в криолитозоне // Геотехника. 2015. № 6. С. 4–11. EDN VXVJZF.
6. Gallavresi F. Ground freezing – the application of the mixed method (brine–liquid nitrogen) // Engineering Geology. 1981. № 18 (1). P. 361–375. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(81\)90074-0](https://doi.org/10.1016/0013-7952(81)90074-0).
7. Monitoring Roadbed Stability in Permafrost Area of Qinghai–Tibet Railway by MT-InSAR Technology / H. Liu, S. Huang, C. Xie [et al.] // Land. 2023. Vol. 12. P. 474.
8. Закирова Э. А., Гаррис Н. А. Как избежать выпучивания опор надземных трубопроводов в районах пучинистых грунтов // Нефтегазовое дело. 2016. Т. 14, № 2. С. 85–92.
9. Юшков Б. С., Сергеев А. С. Исследование зависимости величины морозного пучения глинистых грунтов от скорости промерзания // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2015. № 4. С. 130–140. EDN VEFQGR.

10. Шестернев Д. М., Соколова В. С., Елгина А. И. Влияние скорости промерзания на пучение пород различного состава, строения и свойств // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов : XVI Международная научная-практическая конференция, Чита, 28–30 ноября 2016 года : в 3 ч. Чита : Забайкальский государственный университет, 2016. Ч. 1. С. 191–195. EDN WZVSVH.

11. Ашпиз Е. С., Разуваев Д. А., Нагаев Е. И. Масштабное моделирование морозного пучения грунтов основания земляного полотна при работе сезонно-охлаждающих устройств // TRANSOILCOLD 2023 : материалы 6-го Международного симпозиума по строительному инжинирингу грунтовых сооружений на транспорте в холодных регионах, Москва, 02–05 октября 2023 года / под общей редакцией Т. В. Шепитко. Москва : Дашков и К°, 2023. С. 98–100.

12. Разуваев Д. А., Ашпиз Е. С. Криогенные проблемы эксплуатируемых железнодорожных насыпей восточного участка БАМа и сценарии развития деформаций // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 5 (72). С. 22–34. DOI 10.52170/1815-9265_2024_72_22. EDN HZVBVB.

13. Бухов С. И., Исаков А. Л. Определение температуры начала интенсивного морозного пучения в глинистых грунтах при открытой системе промерзания // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2022. № 4 (7). С. 80–86. DOI 10.52170/2712-9195_2022_4_80. EDN OFBUJU.

Reference

1. Ashpiz E. S. Experience of constructing railway subgrade located on permafrost: problems and solutions. *Bulletin of the United Academic Council of Russian Railways*. 2019;(1):21–27. (In Russ.).
2. Sazonov, V. N., Ashpiz, E. S. Current problems of ensuring the reliability of the subgrade on the Eastern Polygon. *Zheleznodorozhnyj Transport*. 2015;(9):28–31. (In Russ.). ISSN 0044-4448.
3. Sakharov I., Kudryavtsev S., Paramonov V. [et al.] Ensuring the operational suitability of buildings, railways and bridges in the Arctic zone in conditions of global warming. *X International Scientific Siberian Transport Forum – TransSiberia 2022, Novosibirsk, March 02–05, 2022*. Novosibirsk: Elsevier B. V.; 2022. P. 2506–2514. DOI 10.1016/j.trpro.2022.06.288.
4. Tsernant A. A. Innovative technologies for temperature control of soil masses of transport structures in Arctic latitudes. *Construction Materials, Equipment, Technologies of the XXI century*. 2013;(170):26–31. (In Russ.). ISSN 1729-9209.
5. Koloskov G. V., Ibragimov E. V., Gamzaev R. G. On the issue of choosing optimal soil thermostabilization systems during construction in the cryolithozone. *Geotechnics*. 2015;(6):4–11. (In Russ.).
6. Gallavresi F. Ground freezing – the application of the mixed method (brine–liquid nitro-gen). *Engineering Geology*. 1981;18(1):361–375. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(81\)90074-0](https://doi.org/10.1016/0013-7952(81)90074-0).
7. Liu H., Huang S., Xie C. [et al.]. Monitoring Roadbed Stability in Permafrost Area of Qinghai–Tibet Railway by MT-InSAR Technology. *Land*. 2023;12:474.
8. Zakirova E. A., Garris N. A. How to avoid heaving of above-ground pipeline supports in areas of frost-heaving soils. *Oil and Gas Business*. 2016;14(2):85–92. (In Russ.).
9. Yushkov B. S., Sergeev A. S. Study of the dependence of the magnitude of frost heaving of clay soils on the freezing rate. *Transport. Transport Structures. Ecology*. 2015;(4):130–140. (In Russ.).
10. Shesternev D. M., Sokolova V. S., Yeldina A. I. Influence of freezing rate on the heaving of rocks of various compositions, structures, and properties. *Kulagin Readings: Engineering and Technologies of Production Processes: XVI International Scientific and Practical Conference: in 3 parts. Chita, November 28–30, 2016*. Chita: Transbaikal State University; 2016. Part 1. P. 191–195. (In Russ.).
11. Ashpiz E. S., Razuvayev D. A., Nagayev E. I. Large-scale modeling of frost heaving of subgrade foundation soils during the operation of seasonal cooling devices. *TRANSOILCOLD 2023. Proceedings of the 6th International Symposium on Construction Engineering of Ground Structures in Transport in Cold Regions, Moscow, October 02–05, 2023*. Edited by T. V. Shepitko. Moscow: Publishing and Trading Corporation Dashkov and K°, 2023. P. 98–100. (In Russ.).
12. Razuvayev D. A., Ashpiz E. S. Cryogenic problems of operated railway embankments of the eastern section of the Baikal-Amur Mainline and scenarios for the development of deformations. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(72):22–34. DOI 10.52170/1815-9265_2024_72_22. (In Russ.).
13. Bukov S. I., Isakov A. L. Determination of the temperature of the beginning of intensive frost heaving in clay soils with an open freezing system. *Fundamental and Applied Issues of Transport*. 2022;(7):80–86. DOI 10.52170/2712-9195_2022_4_80. (In Russ.).

Информация об авторах

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

Е. С. Ашпиз – доктор технических наук, доцент кафедры «Путь и путевое хозяйство» Российского университета транспорта.

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

Information about the authors

D. A. Razuvayev – Siberian Transport University Department “Track and Track Maintenance”, associate professor.

E. S. Ashpiz – Russian University of Transport department of Geotechnics, tunnels and subways, Doctor of Technical Sciences, associate professor.

E. I. Nagaev – Siberian Transport University Department “Track and track facilities”.

Статья поступила в редакцию 19.08.2025; одобрена после рецензирования 27.08.2025; принятая к публикации 28.08.2025.

The article was submitted 19.08.2025; approved after reviewing 27.08.2025; accepted for publication 28.08.2025.

Научная статья
УДК 656.224(-214)
doi:10.52170/1815-9265_2025_75_42

Применение метрик центральности для поиска критических узлов и оценки их влияния на транспортную сеть

Михаил Аркадьевич Беков

Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия, mihailbekov@mail.ru

Аннотация. В работе предлагается методика идентификации критических узлов транспортной сети мегаполиса на основании комбинированной метрики, учитывающей несколько различных показателей центральности графа. Цель исследования заключается в том, чтобы выявить наиболее значимые элементы транспортной инфраструктуры и оценить их влияние на устойчивость системы при возникновении сбоев. Для построения графа дорожной сети использованы инструменты OSMnx и данные OpenStreetMap, прошедшие фильтрацию по автомобильным дорогам, что позволило сформировать адекватную модель улично-дорожной сети города.

В качестве базовых показателей применены классические метрики центральности: центральность по посредничеству (Betweenness); центральность, основанная на степени узла (Degree); центральность по близости (Closeness); гармоническая центральность (Harmonic), а также метрика по нагрузке (Load). Все метрики нормализованы – приведены к единой шкале для сопоставимости результатов. На их основе предложено использовать интегральную комбинированную метрику, представляющую собой среднее значение нормализованных показателей, что позволяет комплексно учитывать как топологические, так и функциональные свойства узлов.

Для проверки методики проведено имитационное моделирование, включающее сценарии увеличения весов ребер для эмуляции пробок, а также полное исключение из сети отдельных узлов. Полученные результаты подтвердили, что ключевым фактором остается центральность по посредничеству, однако использование комбинированной метрики дает более устойчивую и сбалансированную оценку. Установлено, что удаление критических узлов существенно увеличивает среднюю длину кратчайших путей, что свидетельствует о высокой уязвимости сети и подчеркивает необходимость приоритизации таких объектов при планировании развития и защите транспортной инфраструктуры.

Ключевые слова: критические объекты, транспортная инфраструктура, мультиграф, методы центральности, моделирование графа, транспортные сети

Для цитирования: Беков М. А. Применение метрик центральности для поиска критических узлов и оценки их влияния на транспортную сеть // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 3 (75). С. 42–52. DOI 10.52170/1815-9265_2025_75_42.

Original article

Application of centrality metrics for finding critical nodes and assessing their impact on the transport network

Mikhail A. Bekov

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia, mihailbekov@mail.ru

Abstract. This study introduces a methodology for identifying critical nodes within the metropolitan transport network by employing a composite metric that integrates multiple measures of graph centrality. The primary objective is to determine the most significant elements of urban transport infrastructure and to evaluate their impact on the overall resilience of the system under disruptive conditions. The road network graph was constructed using the OSMnx library and OpenStreetMap data, filtered to include only automobile roads, which ensured an accurate representation of the city's street network.

The analysis is based on several classical centrality indicators, including betweenness centrality, degree centrality, closeness centrality, harmonic centrality, and load centrality. All measures were normalized to a common scale to enable comparability. A composite centrality metric was then proposed, defined as the mean of the normalized values, which provides an integrated assessment of both the topological and functional properties of network nodes.

To validate the proposed approach, simulation experiments were conducted, incorporating scenarios of edge weight increase to emulate traffic congestion as well as the complete removal of selected nodes. The findings demonstrate that betweenness centrality remains the most influential factor in identifying critical nodes; however,

the composite metric yields a more balanced and robust evaluation. Moreover, the removal of critical nodes was shown to significantly increase the average shortest path length, thereby highlighting the vulnerability of the transport system and underscoring the necessity of prioritizing these elements in urban planning, infrastructure development, and resilience strategies.

Keywords: critical objects, transport infrastructure, multigraph, centrality methods, graph modelling, transport networks

For citation: Bekov M. A. Application of centrality metrics for finding critical nodes and assessing their impact on the transport network. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(75):42–52. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_75_42.

Введение

С ростом и модернизацией городской инфраструктуры повышаются требования к надежности, безопасности и эффективности транспортных систем. Методологические аспекты уязвимости транспортных сетей рассматриваются в ряде исследований [1, 2]. Ключевыми элементами этих систем являются критически значимые объекты. Именно от их надлежащего функционирования во многом зависит устойчивость всей сети, поэтому их своевременная идентификация крайне важна. Очевидными примерами критических объектов являются мосты, транспортно-пересадочные узлы, крупные развязки – их значимость относительно легко определить. Однако менее заметными, но не менее важными являются комплексы связанных между собой развязок, отдельные перекрестки и магистрали. Их роль в поддержке дорожного движения зачастую недооценивается, что впоследствии может приводить к многочисленным проблемам в городской инфраструктуре.

Комплексные (сложные) сети (complex networks) [3] представляют собой нетривиальные топологические структуры, математически описываемые в виде графов большого размера. К таковым относятся объекты различной природы, например: социальные сети, сети научного цитирования, графы знаний, телекоммуникационные сети и *транспортные сети* в том числе. Большой интерес к результатам теории сложных сетей [4] в контексте транспортных сетей вызван прежде всего наличием новых подходов к анализу их *надежности, устойчивости и уязвимости*.

Анализ транспортных сетей больших городов, их агломераций, сетей регионального и более крупного масштаба обычно проводится традиционными методами. Характерной особенностью таких методов является стремление агрегировать сеть до размеров, которые поддаются вычислениям и интерпретации. Однако игнорирование сложности сети в угоду существующим

методам не всегда позволяет вскрывать критические объекты и объяснять явления, связанные с ними. Например, не всегда удается объяснить, почему в данном месте часто происходят дорожно-транспортные происшествия или почему на данном перекрестке в данное время возникают заторы при прочих равных условиях.

Так называемый кембрийский взрыв цифровых технологий связан с резким ростом вычислительной мощности компьютеров начиная примерно с 2006 г. и открытым доступом к их ресурсам через облачные сервисы. Возможности работать с большими данными и использование специализированных библиотек прикладных программ открывают перспективы для глубокого анализа транспортных сетей, представленных гигантскими графиками. Однако специфика транспортных сетей добавляет требования к методам. В частности, транспортные сети адекватно описываются ориентированными графиками и их невозможно рассматривать в отрыве от их метрических свойств, таких как пропускная способность и объем трафика. Только топологических свойств для глубокого анализа транспортных сетей недостаточно. Необходимо сочетание топологических методов с методами анализа потоков в сетях [5]. В данной работе рассматриваются современные методы анализа для ориентированных взвешенных графов [6]. Анализируются основные свойства комплексных сетей, основанных на интуитивных и формальных представлениях о значимости узлов и связей в сети. Задача сводится к выбору меры этого влияния. Среди них меры, которые отражают:

- потенциальную активность узла;
- возможность управления прохождением потока, или потоковое посредничество;
- зависимость узла от посредников;
- вовлеченность узла в сетевые маршруты;
- глобальные свойства сети (компактность, связность);
- разрушение сети (отказ узла или связи).

Проблема выбора эффективных методов для оценки устойчивости транспортных сетей остается актуальной, и многие исследователи предлагают разнообразные решения этой задачи [7, 8]. В данной статье выполнен анализ пяти ключевых метрик, позволяющих оценить значимость элементов транспортной сети с разных точек зрения, после чего создана единая комбинированная метрика на основе полученных значений. Комбинированная метрика позволяет учитывать различные факторы, которые могут быть пропущены при использовании только одного метода. Также в работе на примерах конкретного города произведена имитация возмущений транспортной сети и оценены их последствия. Приведены графические результаты таких экспериментов.

Целью данной работы является анализ воздействия узлов транспортной сети на устойчивость транспортной системы мегаполиса путем комбинированного использования метрик центральности, что позволит выявить наиболее уязвимые элементы сети.

Все сформулированные выше задачи в рамках одной работы вряд ли могут быть решены. Здесь основное внимание будет уделено проблеме выделения наиболее важных узлов для дальнейшего их анализа с позиций устойчивости транспортной системы в целом.

Материалы и методы исследования

Далее понятие «транспортная сеть» будет связано с математическим понятием графа и к нему будут применяться методы теории графов. По тексту термины «сеть» и «граф» будут использоваться как синонимы.

Центральность – это понятие, используемое в теории графов для оценки значимости узлов в графе и степени его влияния в целом на сеть [9]. Изначально понятие центральности появилось в социальных сетях. [10]. Этим определяется и смысл самого термина: важность узла в сети и его влияние на другие узлы. Ключевые узлы в транспортной инфраструктуре оцениваются с учетом центральности. Однако влияние напрямую зависит от выбранной меры центральности [11].

Методы центральности помогают выявить критические узлы в транспортных сетях, используя топологическую информацию. Некоторые исследования [12, 13] подчеркивают, что различные методы центральности могут быть

взаимосвязаны в зависимости от характеристик сети, таких как наличие кластеров или модулей. Эти зависимости играют важную роль в принятии решений в транспортном планировании и обеспечении устойчивости сетей в кризисных или критических ситуациях.

В работе для получения графических данных об объектах транспортной инфраструктуры используется библиотека OSMnx [14], которая предоставляет удобные инструменты для загрузки и обработки географических данных из OpenStreetMap. Для непосредственной работы с графиками применяются библиотеки networkx и matplotlib.pyplot [15]. Для выполнения многокритериального анализа и создания комбинированной метрики используется метод MinMaxScaler в модуле sklearn.preprocessing библиотеки Scikit-Learn [16]. Для работы с большим объемом информации и анализа данных используются библиотеки pandas и numpy.

Результаты исследований

В работе на примере Центрального района г. Новосибирска рассматриваются следующие виды центральностей: по посредничеству, по степени, по близости, по Хойде, по нагрузке.

Каждый из этих видов отражает различные аспекты значимости узла в сети, основываясь на его положении и роли в передаче потоков или информации. Для того чтобы понимать подходы к определению критических объектов, основанные на индексах центральности, необходимо представить их в виде математических выражений, что позволит более точно интерпретировать результаты анализа и сравнивать эффективность различных подходов.

Важно также учитывать вычислительную сложность каждого из этих индексов, так как она напрямую влияет на возможность их применения к большим сетям. Индексы центральности, такие как центральность по посредничеству, могут потребовать значительных вычислительных ресурсов для графов большого размера. Ниже представлена таблица, в которой для каждого вида центральности указано соответствующее математическое выражение и оценка его вычислительной сложности, позволяющая определить применимость метода к графикам различного размера [17–21].

В работе [22] описаны результаты работы указанных методов центральности. При использовании только одного из методов можно

Математические выражения и оценка вычислительной сложности индексов центральности, используемых в анализе транспортной сети

Вид центральности	Математическое выражение критерия	Вычислительная сложность
Центральность по посредничеству	$c_B(v) = \sum_{s,t \in V} \frac{\sigma(s,t v)}{\sigma(s,t)},$ где $\sigma(s, t)$ – количество кратчайших путей между вершинами s и t ; $\sigma(s, t v)$ – количество кратчайших путей между вершинами s и t , проходящих через вершину v	$O(n^3)$, где n – количество вершин
Центральность по степени	$c_d(i) = \sum_j^N w_{ij},$ где w_{ij} – вес ребра между вершинами i и j	$O(n)$
Центральность по близости	$c_{WF}(v) = \frac{n-1}{\sum_{u=1}^{n-1} d(v,u)},$ где n – количество вершин в графе; $d(v, u)$ – кратчайшее расстояние между вершинами v и u	$O(n^3)$
Центральность по Хойде	$c_h(u) = \sum_{v \neq u} \frac{1}{d(v,u)}$	$O(n^2)$
Центральность по нагрузке	$c_L(v) = \sum_{s \neq v \neq t} \frac{l_{st}(v)}{l_{st}},$ где l_{st} – количество кратчайших путей между вершинами s и t ; $l_{st}(v)$ – количество кратчайших путей между вершинами s и t , проходящих через вершину v	$O(n^3)$

упустить другие важные свойства транспортной сети ввиду того, что каждый из них имеет свои ограничения или зависимости. Во избежание этого, а также для повышения точности и объективности оценки критических узлов было принято решение внедрить и использовать многоокритериальный анализ в исследовании транспортной сети для разработки единой комбинированной метрики. При расчете метрик учитываются такие параметры, как количество связей узла графа, а также длина прилежащих к нему дорог.

Ввиду того что значения центральностей, в зависимости от метода, могут существенно различаться между собой, необходимо провести нормализацию полученных данных, которая позволит привести их к общей шкале без потери информации о различии их диапазонов.

Для наглядного представления результатов анализа и выявления ключевых статистических особенностей данных используется коробчатая диаграмма. Основной элемент диаграммы – коробка показывает диапазон, в котором сосредоточена половина (50 %) всех значений в наборе данных. Линия внутри коробки указывает на медиану, разделяющую данные на две равные части. «Усы», отходящие от коробки, отображают границы, за ко-

торые не выходят основные значения, исключая наиболее редкие и необычные случаи. Точки за пределами «усов» обозначают «выбросы» – значения, которые существенно отличаются от основной массы данных. Таким образом, коробчатая диаграмма позволяет быстро и наглядно оценить центральную тенденцию, изменчивость и наличие аномалий в данных (рис. 1). По горизонтальной оси диаграммы показаны различные меры центральностей, по вертикальной оси – распределение полученных значений центральностей для каждой меры в результате применения минимаксной нормализации.

На основании диаграммы, предоставленной на рис. 1, можно сделать следующие выводы:

- большинство значений центральности по посредничеству (betweenness) и по нагрузке (load) близки к нулю; это говорит о том, что большинство узлов графа не участвуют активно в транзитных потоках, а только некоторые ключевые узлы переносят значительную часть трафика, что показывают выбросы на графике;

- центральность по близости (closeness) имеет среднюю медиану около 0,7; это значит, что большая часть узлов расположена ближе к остальным частям транспортной сети, а сами значения распределены более равномерно,

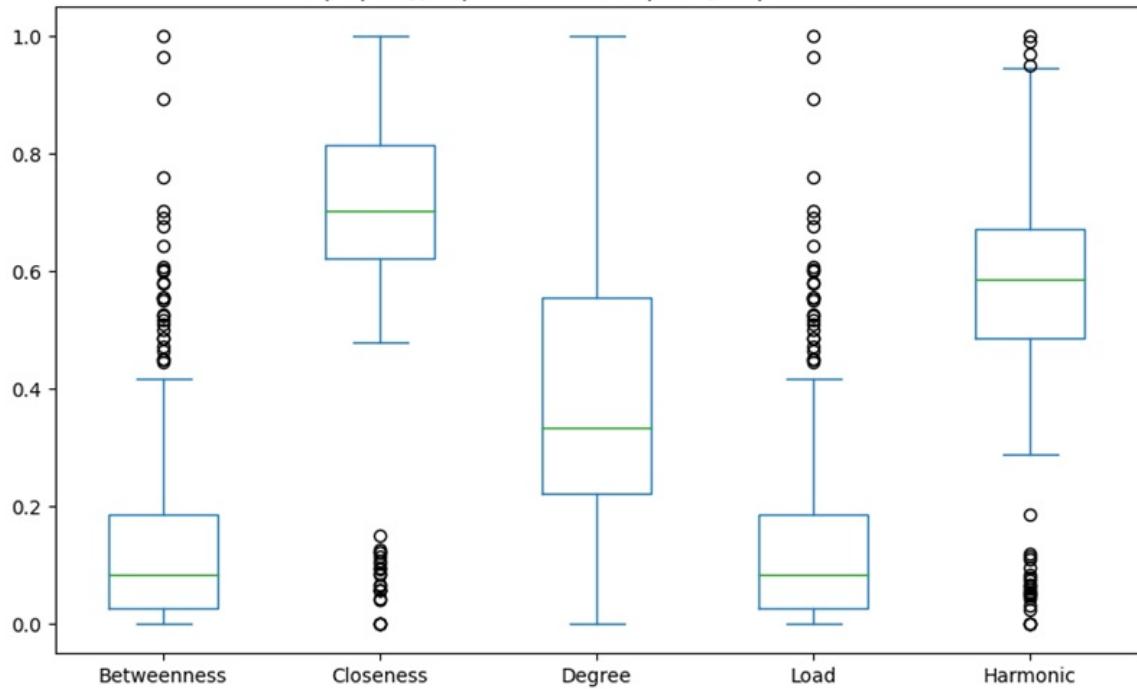


Рис. 1. Коробчатая диаграмма распределения значений индексов центральности для узлов графа транспортной сети

что типично для плотных сетей, где многие узлы расположены близко друг к другу;

– центральность по степени (degree) имеет широкий диапазон значений, но медиана находится на уровне 0,5; довольно разнообразное распределение указывает на наличие как простых дорог, так и крупных перекрестков. Узлы с высокой центральностью по степени могут быть узловыми точками, так как имеют большое количество связей;

– центральность по Хойде (harmonic) имеет несколько выбросов с высокими значениями, а также некоторые выбросы с минимальными значениями, но медиана выше, чем у большинства других методов ввиду того, что высокие значения данного метода указывают на узлы с хорошей связностью.

Как видно из графика и полученных выводов, значения центральностей показывают ожидаемые результаты для транспортной сети, а также имеют различные диапазоны значений; это подтверждает, что каждая метрика по-разному оценивает важность узлов. Таким образом, необходимо реализовать единую комбинированную метрику, которая будет представлять среднее значение среди всех ранее нормализованных значений центральностей. На основе комбинированной метрики были идентифици-

рованы узлы с наивысшими значениями критичности. На рис. 2 показан граф транспортной сети города.

Сравнение результатов, полученных с использованием только метода посредничества и с помощью комбинированной метрики, показало почти полное совпадение. Такой результат объясняется следующим: центральность посредничества отражает способность узла контролировать транспортные потоки, что особенно важно для городской сети с высокой плотностью движения; другие метрики, такие как центральность близости или степени, вносят лишь незначительные корректизы, так как ключевые узлы по этим метрикам совпадают с узлами, определенными через посредничество. Комбинированная метрика увеличивает надежность анализа, позволяя учитывать дополнительные параметры и минимизировать влияние особенностей конкретной метрики.

Для приближения модели к реальной транспортной ситуации было проведено эмульсирование пробок, которое заключалось в модификации длины ребер графа, используемой в качестве веса при расчете центральностей. Результат работы метода по поиску критических узлов графа с учетом эмуляции пробок в транспортной сети показан на рис. 3. Красным

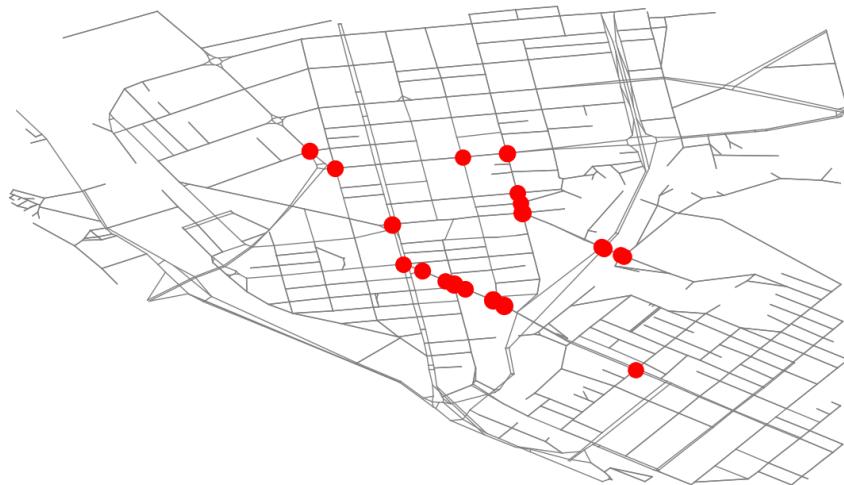


Рис. 2. Граф транспортной сети города с критическими узлами после подсчета комбинированной метрики центральности: жирные точки – критические узлы



Рис. 3. Результат поиска критических узлов после эмуляции пробок на транспортной сети

цветом выделены критические узлы графа транспортной сети до эмуляции пробок, а синим – после эмуляции.

Эмуляция пробок в транспортной сети показала, что поведение критических точек под воздействием нагрузки существенно меняется. Данные изменения обусловлены перераспределением потоков транспортных средств в условиях ограниченной пропускной способности. Увеличение нагрузки на ребра, прилегающие к критическим узлам, приводит к тому, что транспортные потоки вынуждены обходить перегруженные маршруты, перераспределяя нагрузку на другие части сети. Таким

образом, новые узлы становятся более значимыми для поддержания связности графа и транспортной доступности. Появление новых критических точек можно интерпретировать как результат вторичного перераспределения центральности. В исходных условиях они могли обладать сравнительно низкими значениями центральности, но после моделирования пробок их значимость возросла из-за изменения структуры транспортных потоков. Эти узлы можно условно назвать центральностями второго уровня, так как они приобрели свою значимость исключительно в условиях нагрузки.

Можно предположить, что в определенные моменты будет происходить появление центральностей третьего и других уровней из-за перераспределения транспортных потоков с новых узлов, когда они, в свою очередь, становятся перегруженными. Это, очевидно, динамическая картина, которая должна быть связана с уровнем загрузки узлов транспортной сети и с топологией сети (в частности, наличием/отсутствием возможности перераспределения транспортных потоков на другие ребра). Необходимо учитывать (возможно, в дальнейших исследованиях) очевидную связь центральностей с этими двумя факторами.

Сравнение старых и новых критических точек позволяет выделить их различную природу. Узлы, остающиеся критическими в любых условиях, можно считать фундаментальными для структуры транспортной сети: их отказ приводит к значительным последствиям в плане связности и транспортной доступности. С другой стороны, точки, ставшие критическими только после нагрузки, демонстрируют вторичную уязвимость сети, связанную с перенаправлением потоков. Поэтому степень критичности узла следует оценивать в зависимости от задач анализа: для долгосрочного планирования более значимы фундаментальные критические точки, тогда как при

оперативном управлении сеть важно учитывать поведение узлов в условиях нагрузки.

В результате эмуляции пробок было также выявлено общее снижение характеристик транспортной сети. Общая доступность транспортной сети уменьшилась на 1/5, это свидетельствует о том, что пробки не только увеличивают нагрузку на отдельные узлы, но и ухудшают эффективность всей сети, ограничивая перемещение между ее частями, однако живучесть графа составляет 100 %, что указывает на его способность сохранять свою целостность и не дать пробкам разорвать сеть на изолированные части. Таким образом, даже высокоживущие сети с хорошей топологической структурой могут становиться функционально неэффективными под влиянием пробок, поэтому необходима их оптимизация.

Для более детального анализа устойчивости произведена эмуляция сценариев, при которых определенные узлы транспортной сети (например, крупные перекрестки или ключевые дороги) становятся недоступными для движения, что может происходить в реальной жизни из-за аварий, ремонтных работ или других форс-мажорных обстоятельств. Результаты работы метода подсчета средней длины кратчайших путей показаны на рис. 4. По оси X указаны индексы (идентификаторы) удаленных узлов.

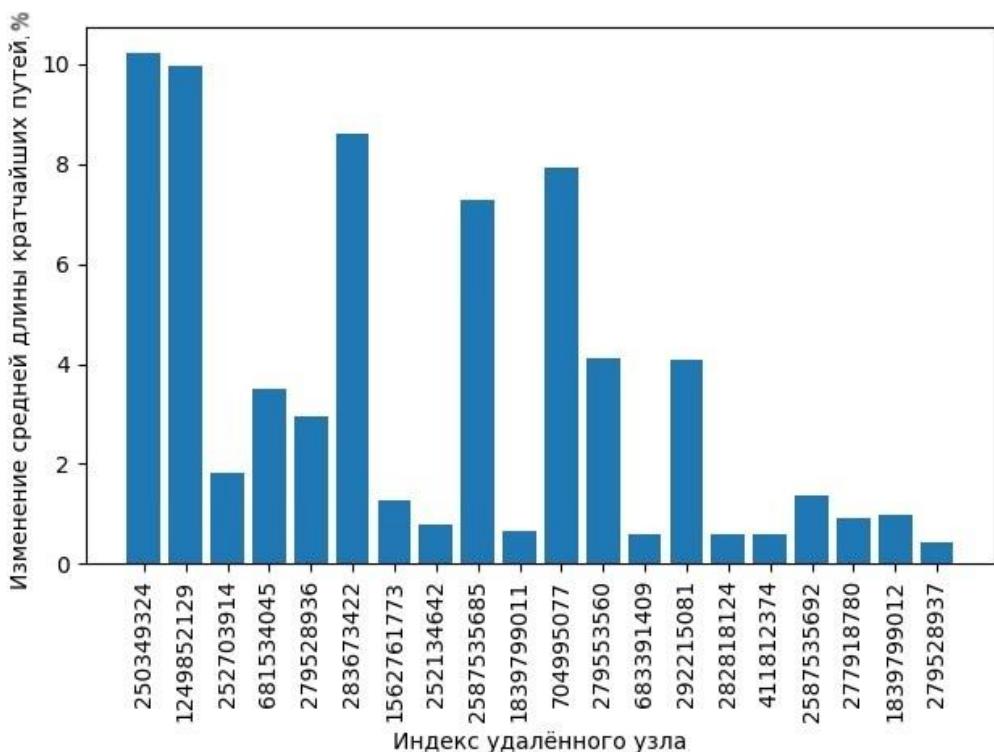


Рис. 4. Результат эмуляции перекрытий критических узлов транспортной сети по отдельности

ных узлов, по оси Y – изменение средней длины кратчайших путей при удалении.

Как видно из диаграммы, удаление некоторых критических узлов оказывает незначительное влияние на изменение средней длины кратчайших путей, а других приводит к значительному увеличению этого показателя. Это объясняется тем, что роль в структуре сети ранее найденных критических точек различна. Некоторые узлы, несмотря на высокие значения центральности, могут не быть напрямую связаны с основными транспортными потоками или обеспечивать альтернативные маршруты, что делает их удаление менее чувствительным для общей структуры сети.

Результаты работы метода подсчета средней длины кратчайших путей после эмуляции аварийных ситуаций и критических перекрытий всех узлов транспортной сети поэтапно показаны на рис. 5. По оси X указано количество удаленных узлов, по оси Y – изменение средней длины кратчайших путей при удалении.

Как видно из графика, влияние поэтапного удаления критических узлов на среднюю длину кратчайших путей имеет нелинейный характер. На начальных этапах удаления происходит незначительное изменение средней длины путей. Однако после удаления следую-

щих узлов наблюдается резкий рост в изменении средней длины путей, это указывает на то, что дальнейшее удаление узлов начинает значительно нарушать структуру сети. Данная закономерность свидетельствует, что определенные узлы играют ключевую роль в обеспечении связности сети и их удаление существенно ухудшает доступность и эффективность маршрутов.

Заключение

В ходе проведенного исследования была рассмотрена роль различных методов центральности в определении критических узлов транспортной сети. Результаты показали, что каждый метод измеряет различные аспекты значимости узлов и использование только одного из них может привести к упущению важных характеристик сети. В связи с этим для повышения точности и объективности оценки был предложен подход многокритериального анализа с использованием комбинированной метрики, что позволило учесть множество факторов и минимизировать ограничения отдельных методов.

Результаты использования комбинированной метрики подтверждают важность центральности посредничества в определении

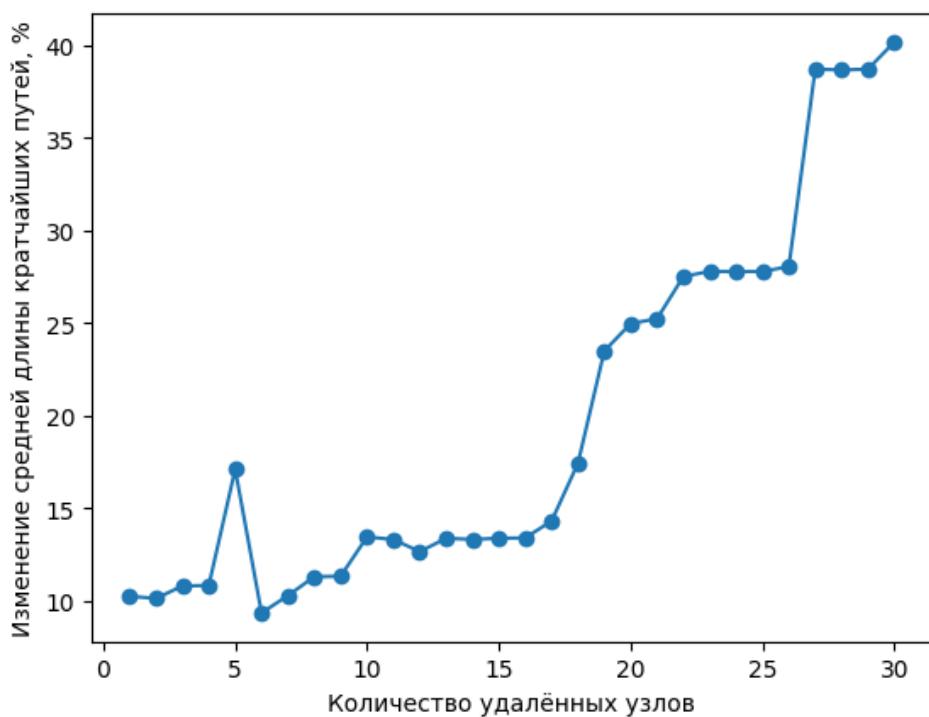


Рис. 5. Результат эмуляции поэтапного перекрытия всех критических узлов транспортной сети

критических узлов, однако добавление дополнительных факторов позволяет учитывать более широкий спектр характеристик сети.

В ходе эмуляции пробок было выявлено, что перераспределение транспортных потоков существенно изменяет набор критических точек. Это подчеркивает необходимость учитывать динамическое поведение сети в реальных условиях. Также было показано, что пробки оказывают значительное негативное влияние на транспортную систему, замедляя движение и увеличивая экономические потери. Влияние пробок на доступность сети и ее эффективность становится очевидным, что подчеркивает важность проведения оптимизационных мероприятий для улучшения работы транспортной сети в условиях ограниченной пропускной способности.

Кроме того, в ходе исследования была проведена эмуляция перекрытия критических узлов графа, что позволило оценить, как удаление этих узлов влияет на структуру транспортной сети. Результаты показали резкое

ухудшение характеристик сети, что подтверждает важность таких узлов для сохранения ее работоспособности. Удаление значительной части критических узлов приводит к существенному увеличению средней длины кратчайших путей и снижению доступности сети.

Таким образом, результаты эмуляции перекрытий узлов подтверждают важность многокритериальной оценки для более точного анализа воздействия различных факторов на сеть, а также показывают, что для повышения устойчивости транспортной сети необходимо учитывать не только статические характеристики узлов, но и динамическое поведение сети при изменении ее структуры.

В целом предложенный подход многокритериальной оценки, эмуляции пробок и эмуляции перекрытий может служить основой для более точного анализа и управления транспортными сетями, а также для разработки стратегий их оптимизации и повышения устойчивости к нагрузкам.

Список источников

1. Complexity and Vulnerability Analysis of Critical Infrastructures: A Methodological Approach / Y. Deng, L. Song, Z. Zhou, P. Liu // Hindawi Mathematical Problems in Engineering. 2017. Vol. 2. P. 1–12. Article ID8673143.
2. Mattsson L., Jenelius E. Vulnerability and resilience of transport systems A discussion of recent research // Transportation Research. Part A. Policy and Practice. 2015. Vol. 81. P. 16–34.
3. Крыгин А. А, Куприянов Б. В. Определение критических узлов транспортной сети // Управление большими системами. 2022. Вып. 100. С. 194.
4. Рублева О. Критерий аддитивности конечного метрического пространства // Вестник Московского университета. Математическая механика. 2012. № 2. С. 8–11.
5. Wilson A. G. A statistical theory of spatial distribution models // Transportation Research. 1967. Vol. 1, Iss. 3. P. 253–269.
6. On Uniqueness in Steiner Problem / M. Basok, D. Cherkashin, N. Rastegaev, Ya. Teplitskaya // International Mathematics Research Notices. 2024. P. 8819–8838. <https://doi.org/10.1093/imrn/rnae025>.
7. Winter P. Steiner Problem in Networks: A Survey // Networks. 1987. P. 129–167. <https://doi.org/10.1002/net.3230170203>.
8. Lalou M., Tahraoui M. A., Kheddouci H. The Critical Node Detection Problem in Networks: A Survey // Comp. Sci. Rev. 2018. Vol. 28. P. 92–117. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2018.02.002>.
9. A comparative study of robustness measures for cancer signaling networks / Z. Mingxing, L. Jing, W. Shuai, H. Shan // Big Data and Information Analytics. 2017. Vol. 2, Iss. 1. P. 87–96. DOI 10.3934/bdia.2017011.
10. A comparative study of network robustness measures / J. Liu, M. Zhou, S. Wang, P. Liu // Frontiers of Computer Science. 2017. Vol. 11, Iss. 4. P. 568–584. DOI 10.1007/s11704-016-6108-z.
11. Щербакова Н. Г. Меры центральности в сетях // Проблемы информатики. 2015. № 1. С. 18–30.
12. Хабаров В. И., Беков М. А., Квашнин В. Е. Критические объекты транспортной инфраструктуры мегаполисов и агломераций // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 3 (70). С. 20–27. DOI 10.52170/1815-9265_2024_70_20.
13. Borgatti S., Everett M. A graph-theoretic perspective on centrality // Social Networks. 2006. Part 28. DOI 10.1016/j.socnet.2005.11.005.
14. Stamos I., Paravantis J. A. Transportation Networks in the Face of Climate Change Adaptation: A Review of Centrality Measures // Future Transportation. 2023. Vol. 3 (3). P. 878–900. DOI 10.3390/futuretransp3030049.
15. Holme P. Consistency and differences between centrality measures across distinct classes of networks // PLOS ONE. 2021. Vol. 16 (7). DOI 10.1371/journal.pone.0220061.

16. Boeing G. OSMnx: New Methods for Acquiring, Constructing, Analyzing, and Visualizing Complex Street Networks // Computers, Environment and Urban Systems. 2017. Vol. 65. P. 126–139.
17. Pandas: fast, powerful, flexible and easy to use open-source data analysis and manipulation tool // Pandas. URL: <https://pandas.pydata.org> (дата обращения: 10.10.2024).
18. Numpy: The fundamental package for scientific computing with Python // NumPy. URL: <https://numpy.org> (дата обращения: 10.10.2024).
19. Freeman L. C. Centrality in Social Networks: Conceptual Clarification // Social Networks. 1979. Vol. 1 (3). P. 215–239. DOI 10.1016/0378-8733(78)90021-7.
20. Hoede C., Bakker R. A Theory of Domination in Graphs // Discrete Mathematics. 1996. Vol. 151 (1-3). P. 207–214. DOI 10.1016/0012-365X(95)00215-6.
21. Freeman L. C. A Set of Measures of Centrality Based on Betweenness. Sociometry. 1977. Vol. 40 (1). P. 35–41. DOI 10.2307/3033543.
22. Беков М. А. Анализ применения методов центральности для поиска критических узлов на примере графа города N // Политранспортные системы : материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (24–25 октября 2024 г.) ; Сиб. гос. ун-т путей сообщения. Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2024. С. 465–470.

References

1. Deng Y., Song L., Zhou Z., Liu P. Complexity and Vulnerability Analysis of Critical Infrastructures: A Methodological Approach. *Hindawi Mathematical Problems in Engineering*. 2017;2:1–12. Article ID8673143.
2. Mattsson L., Jenelius E. Vulnerability and resilience of transport systems A discussion of recent research. *Transportation Research Part A-policy and Practice*. 2015;81:16–34.
3. Krygin A. A., Kupriyanov B. V. Determination of critical nodes in a transport network. *Management of Large Systems*. 2022;100:194. (In Russ.).
4. Rubleva O. Additivity criterion for finite metric spaces. *Bulletin of Moscow University, Mathematical Mechanics*. 2012;(2):8–11. (In Russ.).
5. Wilson A. G. A statistical theory of spatial distribution models. *Transportation Research*. 1967;1(3):253–269.
6. Basok M., Cherkashin D., Rastegaev N., Teplitskaya Ya. On Uniqueness in Steiner Problem. *International Mathematics Research Notices*. 2024. P. 8819–8838. <https://doi.org/10.1093/imrn/rnae025>.
7. Winter P. Steiner Problem in Networks: A Survey. *Networks*. 1987. P. 129–167. <https://doi.org/10.1002/net.3230170203>.
8. Lalou M., Tahraoui M. A., Kheddouci H. The Critical Node Detection Problem in Networks: A Survey. *Comp. Sci. Rev.* 2018;28:92–117. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2018.02.002>.
9. Mingxing Z., Jing L., Shuai W., Shan H. A comparative study of robustness measures for cancer signaling networks. *Big Data and Information Analytics*. 2017;2(1):87–96. DOI 10.3934/bdia.2017011.
10. Liu J., Zhou M., Wang S., Liu P. A comparative study of network robustness measures. *Frontiers of Computer Science*. 2017;11(4):568–584. DOI 10.1007/s11704-016-6108-z.
11. Shcherbakova N. G. Measures of centrality in networks. *Problems of Informatics*. 2015;(1):18–30. (In Russ.).
12. Khabarov V. I., Bekov M. A., Kvashnin V. E. Critical transport infrastructure facilities in megacities and agglomerations. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(70):20–27. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_70_20.
13. Borgatti S., Everett M. A graph-theoretic perspective on centrality. *Social Networks*. 2006. Part 28. DOI 10.1016/j.socnet.2005.11.005.
14. Stamos I., Paravantis J. A. Transportation Networks in the Face of Climate Change Adaptation: A Review of Centrality Measures. *Future Transportation*. 2023;3(3):878–900. DOI 10.3390/futuretransp3030049.
15. Holme P. Consistency and differences between centrality measures across distinct classes of networks. *PLOS ONE*. 2021;16(7). DOI 10.1371/journal.pone.0220061.
16. Boeing G. OSMnx: New Methods for Acquiring, Constructing, Analyzing, and Visualizing Complex Street Networks. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2017;65:126–139.
17. Pandas: fast, powerful, flexible and easy to use open-source data analysis and manipulation tool. *Pandas*. URL: <https://pandas.pydata.org>.
18. Numpy: The fundamental package for scientific computing with Python. *NumPy*. URL: <https://numpy.org>.
19. Freeman L. C. Centrality in Social Networks: Conceptual Clarification. *Social Networks*. 1979;1(3):215–239. DOI 10.1016/0378-8733(78)90021-7.
20. Hoede C., Bakker R. A Theory of Domination in Graphs. *Discrete Mathematics*. 1996;151(1-3):207–214. DOI 10.1016/0012-365X(95)00215-6.

21. Freeman L. C. A Set of Measures of Centrality Based on Betweenness. *Sociometry*. 1977;40(1):35–41. DOI 10.2307/3033543.

22. Bekov M. A. Analysing the Methods Centrality Application for Searching Critical Nodes on the Example of a Graph of City N. *Polytransport systems: Proceedings of the XIII All-Russian scientific and technical conference with international participation (October 24-25, 2024); Siberian Transport University*. Novosibirsk: Publishing House of Siberian Transport University; 2024. P. 465–470. (In Russ.).

Информация об авторе

М. А. Беков – аспирант кафедры «Информационные технологии на транспорте» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the author

M. A. Bekov – Postgraduate Student of the Information Technologies in Transport Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 21.08.2025; одобрена после рецензирования 25.08.2025; принята к публикации 28.08.2025.

The article was submitted 21.08.2025; approved after reviewing 25.08.2025; accepted for publication 28.08.2025.

Научная статья

УДК 656.21

doi:10.52170/1815-9265_2025_75_53

Комплексный расчет занятости стрелочных горловин при работе с поездами нестандартной длины

Андрей Александрович Фрибус¹, Сергей Владимирович Карасев^{2✉}

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

¹fribus-2000@mail.ru

²gdsugdsu@yandex.ru✉

Аннотация. Современные тенденции увеличения массы и длины грузовых поездов создают значительные нагрузки на железнодорожную инфраструктуру, приводя к дисбалансу между растущими объемами перевозок и пропускной способностью станций. Работа с поездами длиной, превышающей стандартную полезную длину приемо-отправочных путей, увеличивает занятость элементов стрелочных горловин, приемо-отправочных и соединительных путей, приводит к росту объема маневровой работы по перестановке невмещающихся частей составов. Указанные негативные эффекты существенно зависят как от параметров поездов (длины поездов, количества вагонов), так и от конструктивных особенностей конкретной станции. Так, например, корректное определение дополнительной занятости стрелочных горловин и приемо-отправочных путей требует учета конструкции соединений путей, наличия параллельных ходов и вариантов маршрутов, секционирования парков. Имеют значение длины маршрутов приема, отправления поездов и маневровых передвижений, расположение изостыков и границы стрелочных изолированных секций. Кроме того, важна динамика движения поездов при приеме, отправлении, влияющая на длительность занятия различных элементов горловин и парков, которая зависит не только от длины маршрута (как в классической методике расчета загрузки горловин), но и от других факторов, включая план и продольный профиль пути, ограничения скорости. Обеспечение корректности определения влияния работы с поездами нестандартной длины с учетом вышеизложенного требует совершенствования методов моделирования работы горловин и парков.

В статье предлагается новая методика оценки загрузки элементов путевого развития станций, основой которой является комплексная модель, включающая имитационную модель работы стрелочных горловин с реализацией ресурсного подхода к рассмотрению занятости элементов, а также базу данных с покоординатным представлением кривых времени движения транспортных единиц с привязкой к границам изолированных секций.

Ресурсный подход в имитационной модели предполагает, что каждый объект инфраструктуры (стрелочные переводы, пути и др.) рассматривается как отдельный ресурс, занятость которого определяется временными интервалами. Метод реализуется с применением имитационного моделирования в среде AnyLogic, что позволяет упростить расчеты и повысить точность оценки пропускной способности. Покоординатное представление кривых времени движения предложено выполнять на основе автономной имитационной модели тяговых и тормозных расчетов. Особое внимание удалено автоматизации расчета времени занятия стрелочных горловин с применением кусочно-линейной аппроксимации кривых времени движения поездов.

Ключевые слова: железнодорожная инфраструктура, пропускная способность, ресурсный метод, имитационное моделирование, AnyLogic, тяговые расчеты, поезда повышенной массы и длины, соединенные поезда, длинносоставные поезда

Для цитирования: Фрибус А. А., Карасев С. В. Комплексный расчет занятости стрелочных горловин при работе с поездами нестандартной длины // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 3 (75). С. 53–65. DOI 10.52170/1815-9265_2025_75_53.

Original article

Comprehensive calculation of switching zone occupancy in operations with non-standard length trains

Andrey A. Fribus¹, Sergey V. Karasev^{2✉}

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

¹fribus-2000@mail.ru

²gdsugdsu@yandex.ru✉

Abstract. Modern trends of increasing the weight and length of freight trains impose significant loads on railway infrastructure, leading to an imbalance between growing traffic volumes and station capacity. Handling trains whose length exceeds the standard useful length of receiving-departure tracks increases the occupancy of switching zone elements, receiving-departure and connecting tracks, and leads to an increase in the volume of shunting work for repositioning parts of trains that do not fit within the tracks. These negative effects significantly depend on both train parameters (train length, number of cars) and the design features of a particular station. For instance, accurately determining the additional occupancy of switching zones and receiving-departure tracks requires considering the track layout design, the availability of parallel moves and alternative routes, and the sectionalization of yards. The lengths of receiving, departing, and shunting movement routes, as well as the location of insulation joints and boundaries of insulated switching sections, are also significant. Furthermore, the dynamics of train movement during reception and departure, which affects the duration of occupancy of various yard and switching zone elements, is important. This dynamics depends not only on the route length (as in the classical methodology for calculating switching zone load) but also on other factors, including track plan and profile, and speed restrictions. Ensuring accurate assessment of the impact of operating non-standard length trains, considering the above, requires improved methods for modeling the operation of switching zones and yards.

This article proposes a new methodology for assessing the load on station track development elements. Its core is a comprehensive model that includes a simulation model of switching zone operations implementing a resource-based approach to element occupancy, coupled with a database containing coordinate-based representations of travel time curves for transportation units referenced to insulated section boundaries.

The resource-based approach in the simulation model implies that each infrastructure object (switches, tracks, etc.) is considered a separate resource, whose occupancy is defined by time intervals. The method is implemented using simulation modeling in the AnyLogic environment, which simplifies calculations and enhances the accuracy of capacity assessment. The coordinate-based representation of travel time curves is proposed to be generated based on an autonomous simulation model for traction and braking calculations. Particular attention is paid to automating the calculation of switching zone occupancy times using piece-wise linear approximation of train travel time curves.

Keywords: railway infrastructure, carrying capacity, resource-based method, simulation modeling, AnyLogic, traction calculations, heavy haul trains, combined trains, long trains

For citation: Fribus A. A., Karasev S. V. Comprehensive calculation of switching zone occupancy in operations with non-standard length trains. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(75):53–65. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_75_53.

Введение

В современных условиях исчерпания пропускных способностей на ряде основных направлений, а также с учетом роста мощности и тяговых возможностей современных поездных локомотивов имеется тенденция увеличения массы и длины поездов, пропуска соединенных, длинносоставных и тяжеловесных поездов. Такие изменения вносят значительные корректизы в работу всей железнодорожной сети. Также существенно меняются условия работы железнодорожных станций [1–3]. Ключевой проблемой является то, что существующая инфраструктура, включая длину станционных путей и пропускную способность железнодорожных станций и узлов, зачастую не соответствует реальным потребностям. Это приводит к дисбалансу между растущими объемами движения и техническими возможностями путевого развития, что, в свою очередь, становится причиной задержек, а также снижения скорости доставки грузов и делает железнодорожные перевозки менее конкурентоспособными на рынке. Систематизация основных последствий от пропуска по сети поездов нестандартной длины приведена на рис. 1.

Так, на ряде направлений уже применяются нестандартные технологические решения для разгрузки инфраструктуры, такие как

деление составов на предвходных участках станции, пропуск поездов по неправильному пути или использование виртуальной сцепки, однако системного подхода к адаптации сети под новые параметры поездопотока пока не выработано [4].

Проблема усугубляется избыточным парком грузовых вагонов, который, по данным ИЭРТ, в 2025 г. достиг 1,4 млн ед. При этом, несмотря на количественный рост подвижного состава, многие грузоотправители сталкиваются с дефицитом вагонов для обеспечения погрузки, что свидетельствует не только о недостатках в системе управления вагоно- и поездопотоками, но и о недостаточной пропускной способности инфраструктуры. Эксперты отмечают, что данная проблема в значительной мере вызвана ограниченной емкостью путевого развития железнодорожных станций, недостаточной для освоения существующих и перспективных объемов перевозок [5].

Таким образом, в условиях появления новых категорий поездов, прежде всего поездов повышенной массы и длины, и увеличения размеров движения необходимо принимать меры по обоснованной реконструкции железнодорожной инфраструктуры [6]. Поэтому для разработки мероприятий по реконструкции

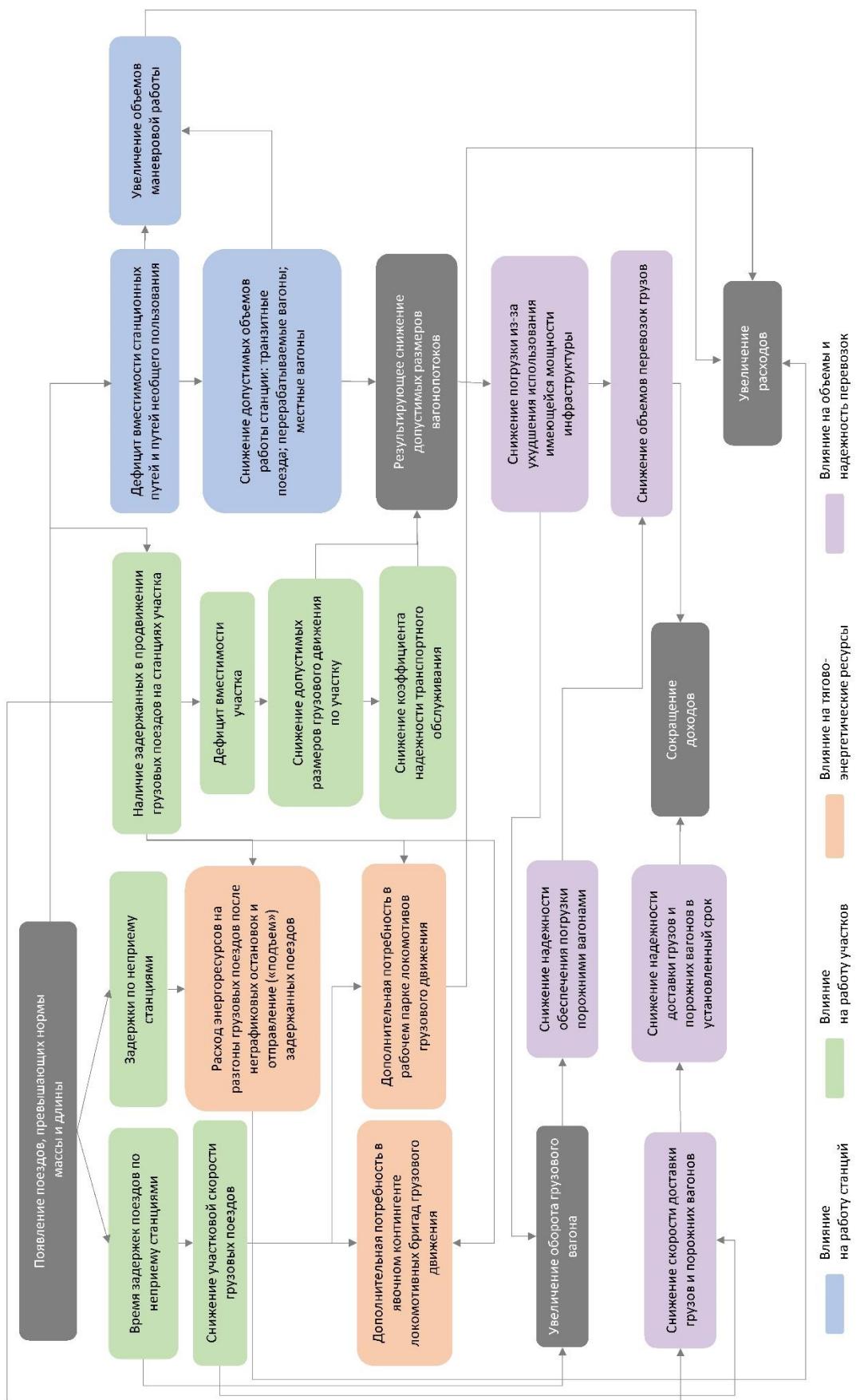


Рис. 1. Систематизация негативных последствий для элементов железнодорожной сети от пропуска поездов с превышением нормы массы и длины

станций в условиях роста массы и длины поездов требуется совершенствовать существующие методики оценки загрузки элементов железнодорожной инфраструктуры, так как традиционные методы, основанные на аналитических расчетах и графических построениях, не учитывают специфику пропуска поездов специализированных категорий и, в частности, работу железнодорожных станций в условиях увеличения количества таких поездов [7].

Материалы и методы исследования

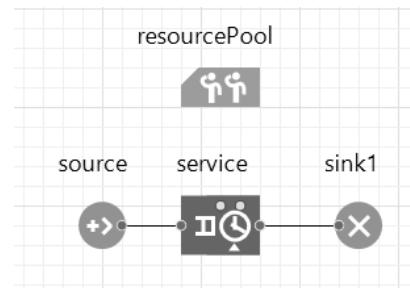
В статье предлагается новый метод оценки загрузки элементов железнодорожных станций, который основан на рассмотрении любого объекта станционной инфраструктуры (стрелочного перевода, приемо-отправочного пути и т. д.), транспортных единиц (маневровых, поездных локомотивов), работников станции в виде ресурсов [8]. Выполнение любой технологической операции, независимо от вида конкретного ресурса, требует затрат времени. Вследствие чего предлагается использовать время в качестве ключевой характеристики ресурсного потенциала объекта инфраструктуры [9].

Таким образом, одним из основных преимуществ ресурсного подхода является возможность единообразного учета всех объектов и субъектов, задействованных при выполнении технологических операций, которые связаны с обработкой поездов, в формате единой имитационной модели железнодорожной станции. Реализовать такой подход возможно, применив различные платформы имитацион-

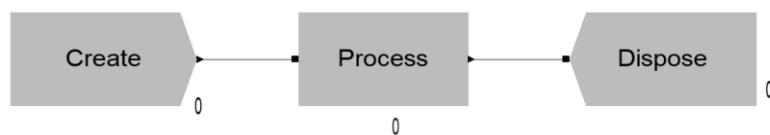
ного моделирования [10, 11], имеющие аналоги ресурсов. Так, на рис. 2 и 3 представлена реализация базовых модулей ресурсного подхода, где транзакт или агент (в зависимости от используемой платформы моделирования), т. е. поезд, производит захват ресурса (например, занимает объект инфраструктуры) на заданный промежуток времени, тем самым имитируя определенную длительность технологического процесса. В случае отсутствия возможности захвата данного ресурса поезд ожидает освобождения ресурса, а затем использует его, перемещаясь по модели. Далее предлагаемый метод рассматривается на базе широко распространенного программного комплекса AnyLogic.

Универсальные системы имитационного моделирования могут включать в себя специализированные библиотеки инструментов для решения фактических задач. Так, в пакет AnyLogic включена железнодорожная библиотека. Ее основным преимуществом перед универсальной библиотекой процессов является упрощение визуализации, а также реализации стандартных операций (прежде всего, связанных с движением транспортных единиц).

При необходимости моделирования более сложных технологических операций или более точного моделирования процессов (например, интеграции в модель тяговых или тормозных расчетов) указанное преимущество становится в ряде случаев несущественным. Использование специализированной железнодорожной библиотеки может даже ограничивать создание имитационной модели. Так, формируемая с ее помощью модель соответствует



Rис. 2. Базовые модули системы Anylogic



Rис. 3. Базовые модули системы Arena

одному определенному варианту схемных решений железнодорожной инфраструктуры моделируемого объекта. В случае потребности изменения схемных решений, топологии путевого развития фактически потребуется разрабатывать новую модель.

Описываемый далее ресурсный подход к созданию модели железнодорожной станции (или отдельных ее элементов, например стрелочных горловин) с использованием универсальной библиотеки процессов обеспечит значительно большую гибкость как при создании модели, так и при ее дальнейшей адаптации под различные задачи и условия моделирования. Подход является комбинированным и основывается на разделении модели на три независимых компонента:

- 1) геометрическую схему железнодорожной станции (топологию путевого развития);
- 2) логическую схему маршрутов (реализованную средствами универсальной библиотеки процессов AnyLogic);
- 3) внешнюю базу данных по длительности маршрутов поездных и маневровых передвижений, сформированную с помощью метода тяговых расчетов.

Результаты исследования

Предлагаемый подход обеспечивает гибкость перестроения модели за счет разделения ее на структурно независимые компоненты, что позволяет вносить практически любые изменения в любой из трех компонентов без необходимости создания новой модели. Кроме того, предложенный подход не требует глубоких навыков программирования, так как работа с моделью осуществляется на уровне стандартных модулей универсальной библиотеки процессов, что делает метод доступным для широкого круга специалистов.

Далее рассматривается детальное описание на примере четной горловины и западного приемо-отправочного парка станции M железной дороги K . Станция M по характеру работы является участковой, по объему и сложности отнесена к 1-му классу. Станция является стыковой по роду тока, вследствие чего происходит смена локомотивов у всех поездов, которые останавливаются на данной станции. Выбор объекта обусловлен перечисленными выше особенностями, из-за которых объект является достаточно сложным для моделирования.

На первом этапе необходимо выделить на схеме расчетные элементы, которые в дальнейшем будут использоваться как ресурсы в имитационной модели. Такими ресурсами могут быть:

- стрелочные изолированные секции;
- бесстрелочные участки (если они могут использоваться для временного, например при маневрах, нахождения подвижного состава);
- главные, приемо-отправочные, соединительные пути.

Пример выделения расчетных элементов представлен на рис. 4. Оставшиеся стрелочные переводы не выделяются в качестве отдельных ресурсов, так как они являются неотъемлемыми частями парка.

На втором этапе требуется сформировать алгоритм работы имитационной модели. Ресурсная модель четной горловины станции M представлена на рис. 5, алгоритм модели для рассматриваемых условий – на рис. 6. Логика модели отображена на рис. 7.

Модель состоит из следующих компонентов:

1. Блоки Source генерируют подход поездов согласно заданному расписанию. В данной имитационной модели рассматриваются поезда стандартной длины и поезда, длина которых превышает норму. Количество блоков Source зависит от детализации деления подхода поездов к конкретной станции.

2. С помощью блока Queue моделируется очередь (задержки) в подходе. Программный комплекс AnyLogic позволяет формировать очередь согласно моментам прибытия или заданному приоритету приема.

3. С помощью блоков SelectOutput проверяется свободность занятия основного или варианного маршрута приема (т. е. всех ресурсов, входящих в маршрут). Изначально идет проверка выбора секции приема поезда. Если прибывает поезд повышенной длины, то он сразу принимается на пути 42–44, так как они вмещают до 145 условных вагонов. Если эти пути заняты – на соседние пути с дальнейшей отцепкой хвоста (т. е. с делением на части). Для поездов стандартной длины на данной станции имеется один основной маршрут приема, который состоит из следующих ресурсов: R4_44_46, R_bs1, R6, R12_14, R16, Пути 30_36. Если данный маршрут занят, то идет проверка на свободность варианного маршрута 1, который состоит из следующих ресурсов: R4_44_46, R8_18, R16, Пути 30_36. Если и этот маршрут занят, то поезд принимается на соседнюю секцию по маршруту: R4_6, R8_18, Пути 38_40.

Западная приемо-отправочная парк

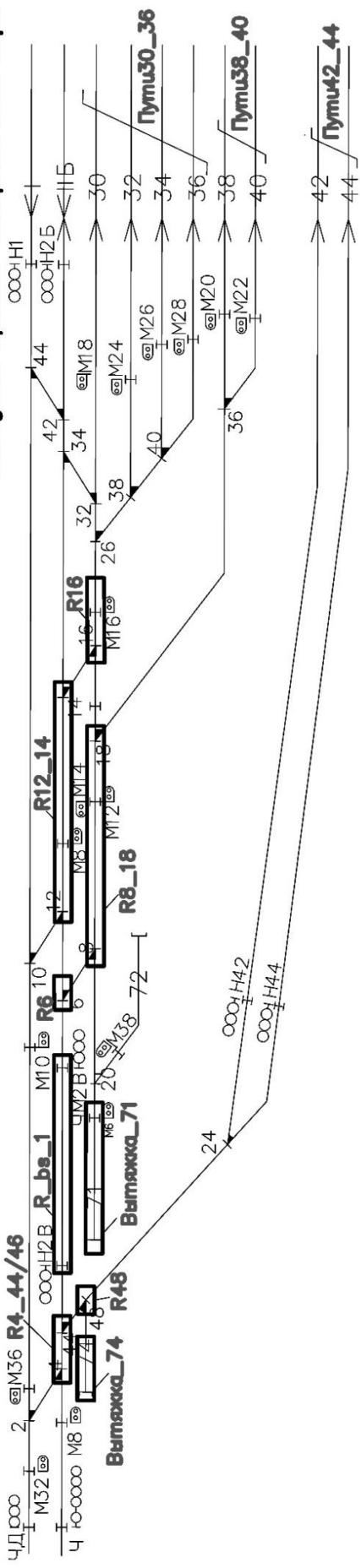


Рис. 4. Конструктивная схема приемо-отправочного парка станции *M* с расчетными элементами

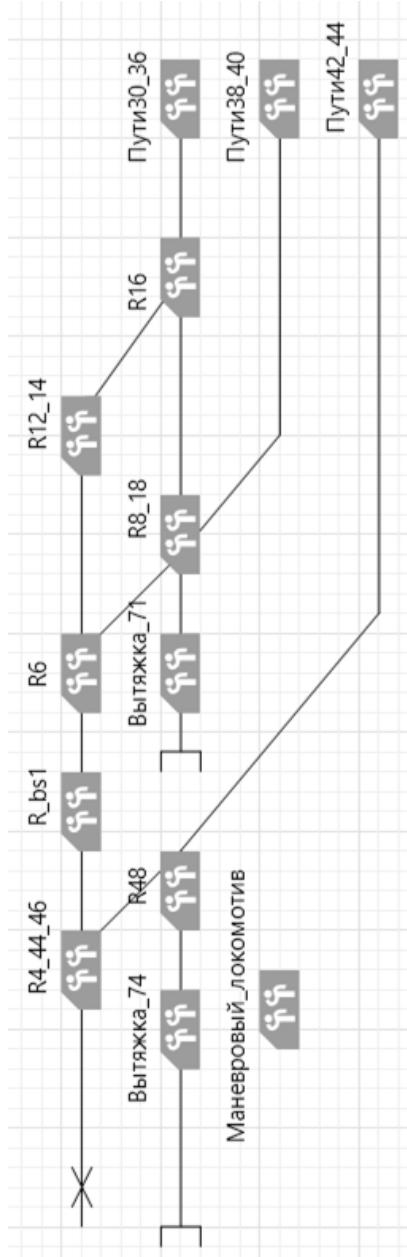


Рис. 5. Ресурсная модель четной горловины станции *M*

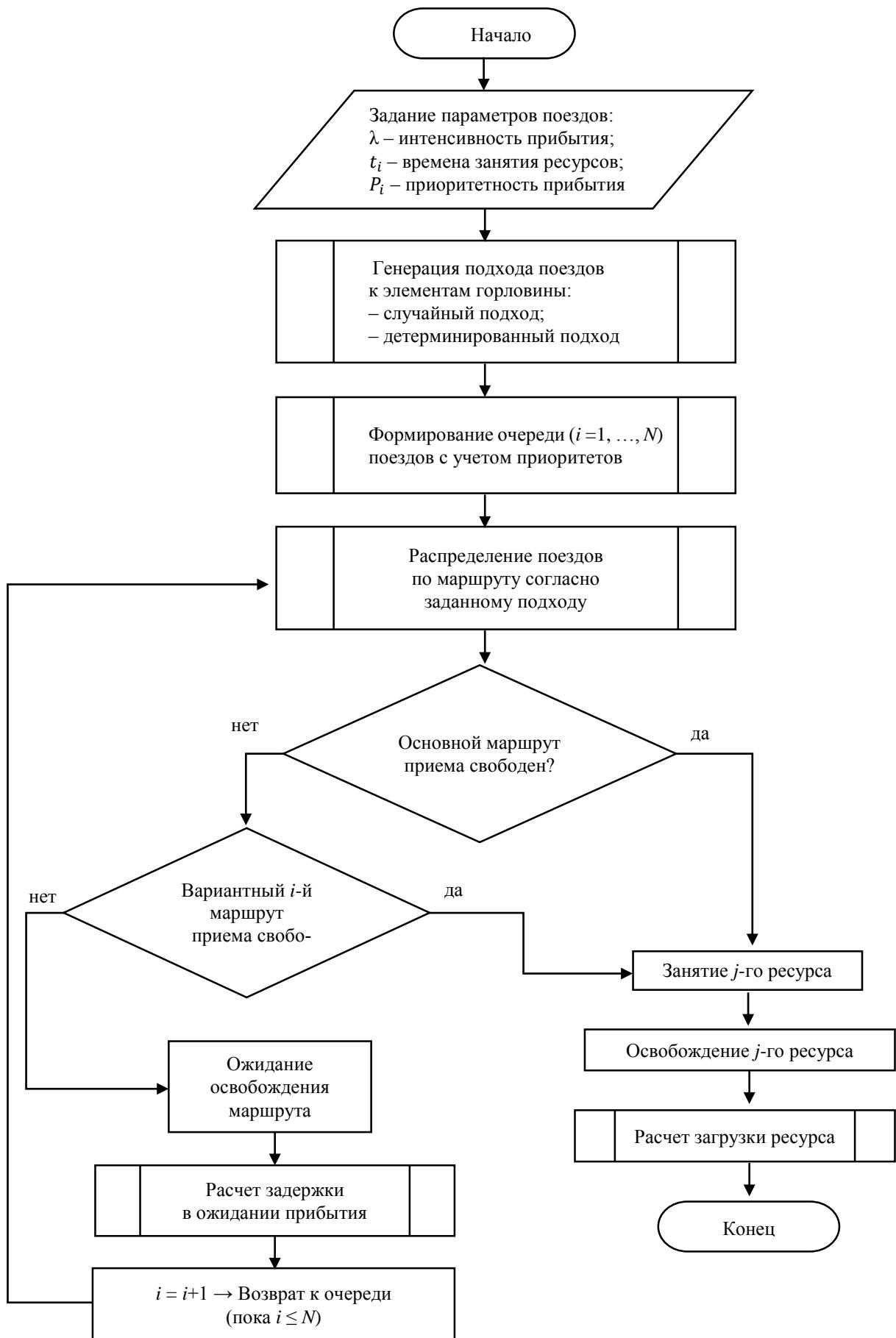


Рис. 6. Алгоритм работы имитационной модели

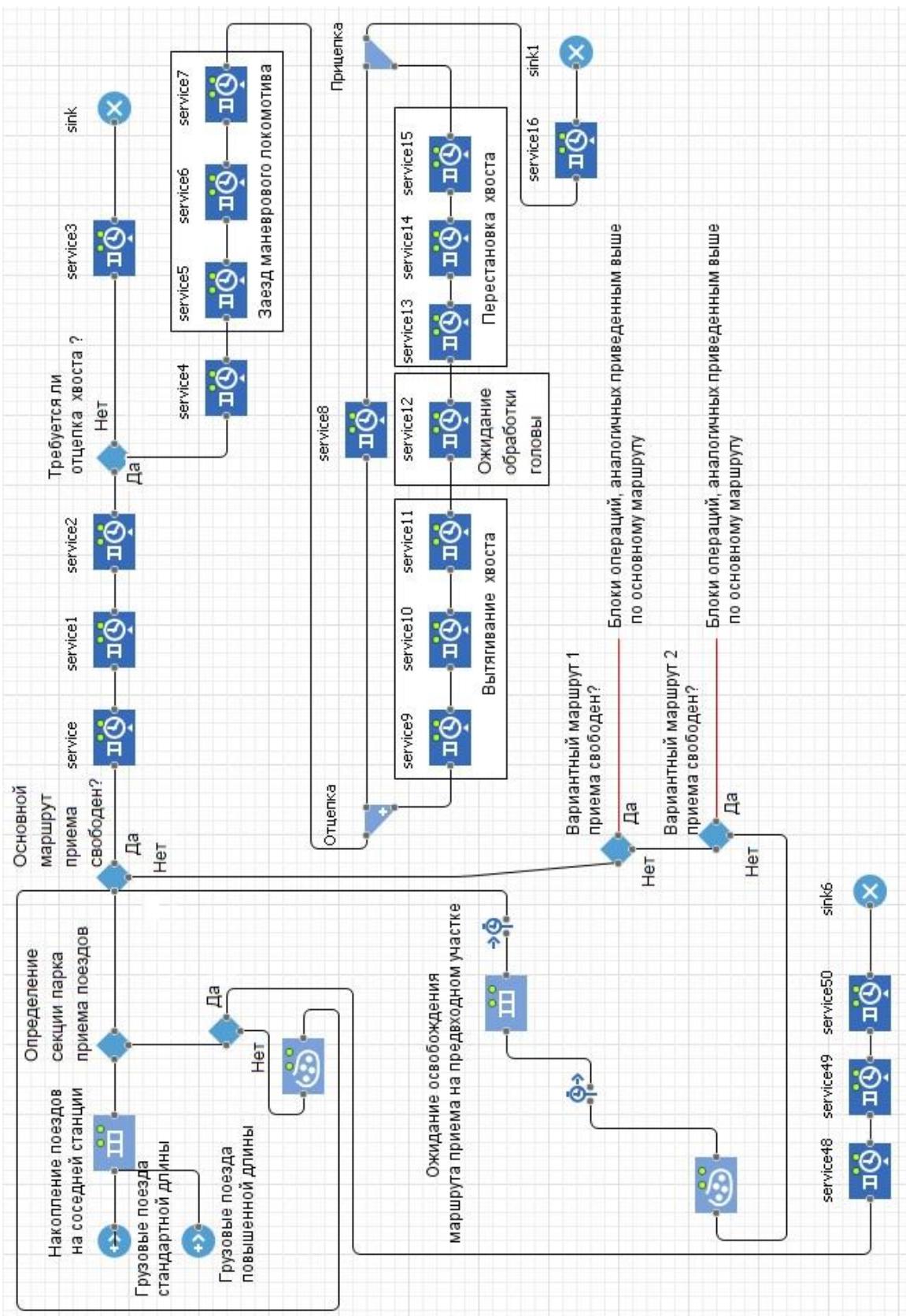


Рис. 7. Логика работы имитационной модели горловины с учетом наличия вариантовых маршрутов и посекционного освобождения стрелочных изолированных секций

4. Блоки Service имитируют процесс занятия ресурса на заданный промежуток времени. При каждом поездном или маневровом передвижении занятие всех расчетных элементов (ресурсов), задействованных в маршруте, происходит одномоментно (в момент приготовления соответствующего маршрута), а освобождение – постепенно, в моменты физического освобождения соответствующих изостыков. Данные блоки выстроены таким образом, что во время прохождения маршрута ресурсы постепенно освобождаются, что позволяет моделировать процесс размыкания рельсовых цепей. Время занятия каждого ресурса определяется на основе внешней базы данных по длительности маршрутов поездных и маневровых передвижений, формируемых с использованием тяговых и тормозных расчетов. Эта база является третьим компонентом предлагаемой модели (ее формирование будет пояснено ниже) [12].

5. С помощью блоков timeMeasureStart и timeMeasureEnd производится измерение задержек, связанных с ожиданием свободности маршрута приема (т. е. входящих в него ресурсов). Полученные временные показатели могут быть использованы для количественной оценки эксплуатационных и экономических потерь, связанных с задержками и простоями подвижного состава, что в дальнейшем служит основой для выбора оптимального варианта развития инфраструктуры железнодорожной станции.

Моделирование работы стрелочных горловин по предлагаемой методике требует задания длительности занятия каждого элемента (ресурса), входящего в маршруты приема, пропуска, отправления поездов, а также маневровых передвижений. При этом для корректного учета занятости элементов горловины необходима разбивка этого времени по каждому ресурсу. Это предлагается делать следующим образом.

Для каждого вида передвижения определяется его полная длительность методом модели-

рования тяговых расчетов, например с использованием программы «Оптимальная тяга» [13]. На расстоянии соответствующего поездного или маневрового передвижения получают кривые скорости и времени движения. Использование тяговых расчетов позволяет максимально точно учесть влияние на движение поезда или маневрового состава параметров плана и продольного профиля на маршруте.

Далее необходимо кривую времени сопоставить с масштабным планом горловины (или масштабной геометрической моделью, корректно отображающей расстояния) – рис. 8.

С учетом того что кривая времени строится по геометрическому центру состава, при определении времени занятия стрелочных изолированных секций (расчетных элементов горловины) необходимо учитывать длину состава.

Для автоматизации расчетов времени занятия элементов стрелочных горловин кривая времени, полученная в результате тяговых расчетов, аппроксимируется кусочно-линейной функцией. Кривая представляется в виде набора отрезков прямых линий. В предлагаемой методике длина шага составляет 20 м.

Пусть кривая времени задана координатами точек (X_i, Y_i) , где X_i – расстояние от начала маршрута, м; Y_i – значение времени, соответствующее расстоянию X_i .

Таким образом, получим описание кривой времени, которое представлено в таблице. Тогда для каждого отрезка прямой линии, соединяющего точки с координатами (X_i, Y_i) и (X_{i+1}, Y_{i+1}) , можно записать уравнение

$$Y_i = k_i X + b_i \text{ при } X_i \leq X \leq X_{i+1}. \quad (1)$$

Следовательно, покоординатная разбивка кривой времени движения поезда (или маневрового состава) имеет следующий вид:

$$\begin{cases} Y_{01} = k_{01}X + b_{01} & \text{при } 0 \leq X \leq X_1; \\ Y_{12} = k_{12}X + b_{12} & \text{при } X_1 \leq X \leq X_2; \\ \dots \\ Y_{n-1,n} = k_{n-1,n}X + b_{n-1,n} & \text{при } X_{n-1,n} \leq X \leq X_n. \end{cases} \quad (2)$$

Таким образом, кривая времени представляется в виде множества линейных уравнений и для определения затрат времени в любой точке

Покоординатное представление кривой времени поездного или маневрового передвижения

Длина шага	Значение X_i	Значение Y_i
20	X_1	Y_1
40	X_2	Y_2
60	X_3	Y_3
...
N	X_n	Y_n

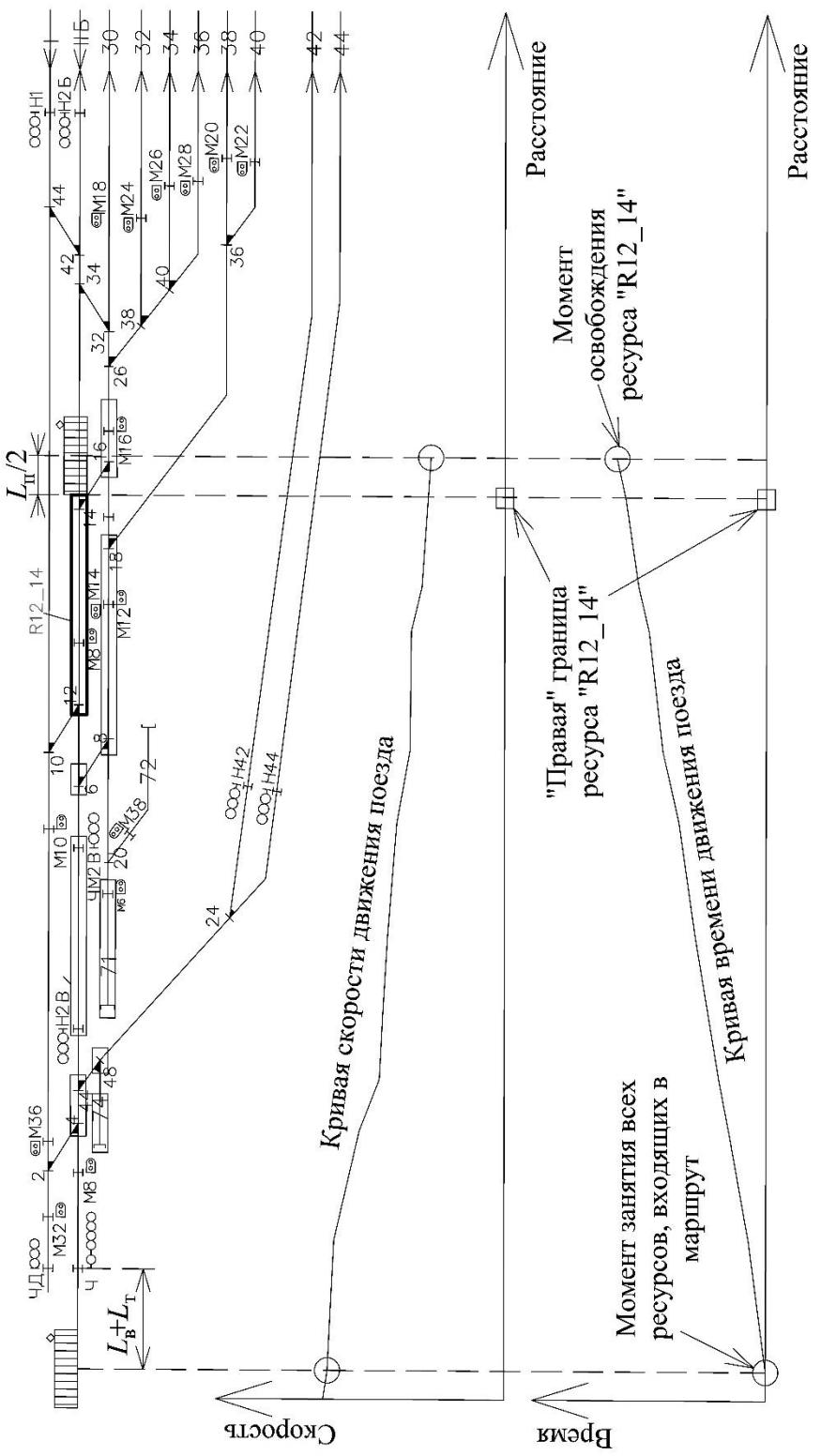


Рис. 8. Схема определения длительности занятия ресурсов по кривой времени движения с учетом освобождения изолированных секций
(пример для ресурса «R12_14» для маршрута приема поезда):
 L_n – длина поезда; L_r – длина тормозного пути; L_a – расстояние, проходимое поездом за время восприятия машинистом показаний входного светофора

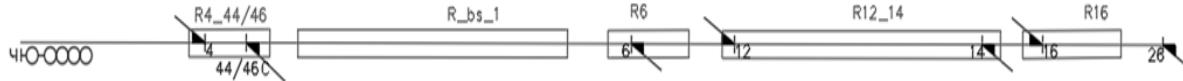


Рис. 9. Разворотка маршрута с выделением границ стрелочных изолированных секций

горловины необходимо знать координату правой (при движении слева направо) границы нужного расчетного элемента (стрелочной изолированной секции) горловины. Для этого предлагаются использовать развертку маршрута передвижения по оси X (рис. 9).

По развертке определяются координаты границ расчетных элементов горловины и формируется база этих координат. В результате для определения времени занятия интересующего ресурса – элемента горловины используется координата его правой границы, для которой по соответствующему уравнению кусочно-линейной аппроксимации рассчитывается время занятия элемента. Таким образом можно определить искомое время занятия ресурсов (элементов горловины) для использования в имитационной модели.

В базу данных по длительности маршрутов поездных и маневровых передвижений вносится покоординатное представление кривых времени для всех поездных и маневровых передвижений и координаты границ расчетных элементов. В случае изменения режимов движения, скоростных ограничений, маршрута пропуска по горловине и при потребности учета иных факторов, влияющих на время движения поезда или маневрового состава, потребуется внести соответствующие изменения в запись в базе, не затрагивая другие элементы модели.

Заключение

Работа с поездами длиной, превышающей стандартную полезную длину приемо-отправочных путей, при устойчивой тенденции к росту их количества увеличивает занятость элементов стрелочных горловин, приемо-отправочных и соединительных путей, приводит к росту объема маневровой работы по перестановке невмещающихся частей составов.

Это негативное влияние существенно зависит как от параметров поездов (длины поездов, количества вагонов), так и от конструктивных особенностей конкретной станции. Корректное определение дополнительной занятости стрелочных горловин и приемо-отправочных путей требует учета конструкции

соединений путей, наличия параллельных ходов и вариантов маршрутов, секционирования парков, динамики движения поездов при приеме и отправлении.

В статье предложена новая методика комплексного расчета занятости стрелочных горловин в условиях работы с поездами нестандартной длины с использованием имитационного моделирования и модели тяговых расчетов.

В методике реализован комбинированный подход, основанный на разделении модели на три независимых компонента:

1) геометрическую схему железнодорожной станции (топологию путевого развития);

2) логическую схему маршрутов (реализованную средствами универсальной библиотеки процессов AnyLogic);

3) внешнюю базу данных по длительности маршрутов поездных и маневровых передвижений, сформированную с помощью метода тяговых расчетов.

На примере железнодорожной станции M железной дороги K продемонстрирован принцип формализации геометрической схемы и логики маршрутов поездных и маневровых передвижений. Описана последовательность формирования базы покоординатного описания кривых времени движения транспортных единиц с привязкой к границам изолированных секций.

Предложенная методика обеспечивает высокую гибкость комплексной модели стрелочных горловин, учет при моделировании значимых характеристик топологии и конструкции путевого развития, а также особенностей использования элементов горловин в условиях работы станции с поездами нестандартной длины. Ресурсная имитационная модель может быть реализована в любой системе имитационного моделирования, имеющей в своей библиотеке аналог ресурса. Методика может использоваться для оценки технологических и экономических потерь станций при работе с поездами нестандартной длины в условиях недостаточного путевого развития и для разработки обоснованных вариантов совершенствования конструктивных и технологических решений железнодорожных станций.

Список источников

1. Колокольников В. С., Фалалеева Т. А. Влияние структуры поездопотока на пропускную способность станции и перегонов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2024. № 1 (93). С. 79–89.
2. Дмитренко А. В., Пушкирева Л. И., Ларченко Е. А. Установление среднего веса грузовых поездов в зависимости от весовой нормы при ограниченной длине станционных путей // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 2 (65). С. 20–28.
3. Дмитренко А. В., Попова Н. Б., Голеня Ю. В. Оценка влияния веса и длины грузовых поездов на пропускную и провозную способности горловин приема сортировочных станций // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2020. № 4 (55). С. 57–64.
4. Новая технология снизила нагрузку на инфраструктуру Находкинского железнодорожного узла // Гудок : [сайт]. URL: <https://gudok.ru/content/analitika/gruzoperevozki/1703600/#photo0> (дата обращения: 11.05.2025).
5. Специалисты ИЭРТ предложили решение главной проблемы РЖД // Гудок : [сайт]. URL: <https://gudok.ru/content/analitika/gruzoperevozki/1703600/#photo0> (дата обращения: 11.05.2025).
6. Фрибус А. А., Каравес С. В. Анализ потребности в развитии нормативной базы для проектирования специализированных парков путей в условиях роста массы и длины поездов // Транспорт: наука, техника, управление : научный информационный сборник. 2025. № 2. С. 3–11.
7. Каравес С. В. Комбинированная модель экспресс-оценки влияния объектной специализации на пропускную способность станционных путей с учетом параметров инфраструктуры // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2022. № 2 (86). С. 132–144.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025662024 Российская Федерация. ГОРЛОВИНА-РЕСУРСЫ-1 – Расчет задержек транспортных единиц и использования ресурсов стрелочной горловины : заявл. 28.04.2025 : опубл. 16.05.2025 / Каравес С. В., Фрибус А. А. ; заявитель Сибирский государственный университет путей сообщения.
9. Каравес С. В. Оценка эффективности специализации объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта, обеспечивающих перевозочный процесс, в постановке задачи оптимального управления ресурсами // Управление эксплуатационной работой на транспорте (Уэрт–2022) : сборник трудов Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 15–16 марта 2022 года / под ред. А. Ю. Панычева, Т. С. Титовой, О. Д. Покровской. Санкт-Петербург : ФГБОУ ВО ПГУПС, 2022. С. 192–196.
10. Функциональное исследование структуры горловин железнодорожных станций / П. А. Козлов, В. С. Колокольников, Н. В. Якушев, К. М. Тимухин // Транспорт Урала. 2024. № 3 (82). С. 11–14.
11. Язов Д. В., Костенко В. В. Моделирование процессов приема грузового поездопотока на техническую станцию при различных исходных параметрах // Пятая международная научно-практическая конференция «Развитие инфраструктуры и логистических технологий в транспортных системах» (Санкт-Петербург, 11–13 октября 2023 г.) : сборник трудов : в 2-х частях. Санкт-Петербург : ФГБОУ ВО ПГУПС, 2023. Ч. 1. С. 247–252.
12. Язов Д. В., Костенко В. В. Математическая модель посекционного занятия горловины железнодорожной станции с учетом динамики прибывающего поезда // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы : сборник трудов LXXXIV Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 15–22 апреля 2024 года. Санкт-Петербург : Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2024. С. 361–366.
13. Кузнецова А. А. Оптимизация технологии вождения грузовых поездов по перегонам по критерию минимума эксплуатационных расходов по пробегу : специальность 05.22.01 «Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кузнецова Арина Александровна. Новосибирск, 2006. 186 с.

References

1. Kolokolnikov V. S., Falaleeva T. A. The influence of the structure of train traffic on the capacity of stations and crossings. *Bulletin of the Rostov State University of Railway Transport*. 2024;(93):79–89. (In Russ.).
2. Dmitrenko A. V., Pushkareva L. I., Larchenko E. A. Determination of the average weight of freight trains depending on the weight norm with a limited length of station tracks. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(65):20–28. (In Russ.).
3. Dmitrenko A. V., Popova N. B., Golenya Yu. V. Assessment of the influence of the weight and length of freight trains on the throughput and carrying capacity of the receiving ports of marshalling yards. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2020;(55):57–64. (In Russ.).

4. New technology has reduced the burden on the infrastructure of the Nakhodka railway hub. *Gudok*. (In Russ.). URL: <https://gudok.ru/content/analitika/gruzoperevozki/1703600/#photo0>.
5. IERT specialists proposed a solution to the main problem of Russian Railways. *Honk*. (In Russ.). URL: <https://gudok.ru/content/analitika/gruzoperevozki/1703600/#photo0>.
6. Fribus A. A., Karasev S. V. Analysis of the need for the development of a regulatory framework for the design of specialized fleets of tracks in conditions of increasing weight and length of trains. *Transport: Science, Technology, Management. Scientific information collection*. 2025;(2):3–11. (In Russ.).
7. Karasev S. V. A combined rapid assessment model of the impact of object specialization on the capacity of station tracks, taking into account infrastructure parameters. *Bulletin of the Rostov State University of Railway Communications*. 2022;(86):132–144.
8. Certificate of state registration of the computer program No. 2025662024 Russian Federation. NECK-RESOURCES-1 – Calculation of delays in transport units and the use of resources of the arrow neck: application 28.04.2025: published 16.05.2025. S. V. Karasev, A. A. Fribus. Applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education ‘Siberian Transport University’. (In Russ.).
9. Karasev S. V. Evaluation of the effectiveness of specialization of railway transport infrastructure facilities providing the transportation process in setting the task of optimal resource management. *Management of operational work in transport (Uert–2022): Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, March 15–16, 2022*. Edited by A. Y. Panycheva, T. S. Titova, O. D. Pokrovskaya; responsible for the issue of A. V. Sugorovsky, G. I. Nikiforova, T. G. Sergeeva, M. A. Marchenko. St. Petersburg: Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University; 2022. P. 192–196. (In Russ.).
10. Kozlov P. A., Kolokolnikov V. S., Yakushev N. V., Timukhin K. M. Functional study of the structure of railway station necks. *Transport of the Urals*. 2024;(82):11–14. (In Russ.).
11. Yazev D. V., Kostenko V. V. Modeling the processes of receiving freight train traffic to a technical station at various initial parameters. *Development of infrastructure and logistics technologies in transport systems. Proceedings in two parts, St. Petersburg, October 11–13, 2023*. St. Petersburg: Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University; 2023. P. 247–252. (In Russ.).
12. Yazev D. V., Kostenko V. V. Mathematical model of sectional occupation of the neck of a railway station, taking into account the dynamics of an arriving train. *Transport: problems, ideas, prospects: Proceedings of the LXXXIV All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists, St. Petersburg, April 15–22, 2024*. St. Petersburg. St. Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I; 2024. P. 361–366. (In Russ.).
13. Kuznetsova A. A. Optimization of technology for driving freight trains over distances according to the criterion of minimum operating costs for mileage: specialty 05.22.01 ‘Transport and transport technology systems of the country, its regions and cities, organization of production in transport’. Dissertation for the degree of Candidate of Engineering / Kuznetsova Arina Aleksandrovna. Novosibirsk; 2006. 186 p. (In Russ.).

Информация об авторах

- А. А. Фрибус – аспирант кафедры «Железнодорожные станции и узлы» Сибирского государственного университета путей сообщения.
- С. В. Карапеев – кандидат технических наук, доцент кафедры «Железнодорожные станции и узлы» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

- A. A. Fribus – Postgraduate Student of the Railway Stations and Junctions Department, Siberian Transport University.
- S. V. Karasev – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Railway Stations and Junctions Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 05.09.2025; одобрена после рецензирования 09.09.2025; принята к публикации 08.09.2025.

The article was submitted 05.09.2025; approved after reviewing 09.09.2025; accepted for publication 08.09.2025.

Научная статья

УДК 625.122

doi:10.52170/1815-9265_2025_75_66

Обоснование выбора модели грунта для исследования стабильности земляного полотна железной дороги при сейсмическом воздействии

Юрий Сергеевич Меркуров^{1✉}, Алексей Федорович Колос²

¹ «ЛенгипроПРОСТРой», Санкт-Петербург, Россия

² Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия

¹ merku50@mail.ru[✉]

² kolos@pgups.ru

Аннотация. В статье рассмотрена проблема численного моделирования напряженно-деформированного состояния грунтового сооружения с учетом сейсмического воздействия. Целью настоящего исследования является обоснование выбора модели грунта, обеспечивающей корректное моделирование сейсмического воздействия на насыпь железнодорожного пути для последующей разработки мероприятий по повышению сейсмостойкости земляного полотна за счет укладки демпфирующего слоя.

На основе анализа графиков зависимости осевой деформации от девиатора напряжений проанализированы основные различия некоторых моделей грунта (линейно-упругой, линейной упруго-идеально-пластической Мора – Кулона, упрочняющегося грунта и упрочняющегося грунта с жесткостью при малых деформациях). Приведены особенности работы моделей грунта в условиях динамического циклического воздействия. Сделаны предположения относительно потенциала каждой из моделей осуществлять затухание колебаний от действия землетрясения.

Методом конечных элементов произведено моделирование стандартного стабилометрического испытания для анализа зависимости осевых деформаций от напряжений. Выполнена оценка соответствия полученных расчетных графиков с теоретическими кривыми и данными лабораторных испытаний.

Произведено моделирование напряженно-деформированного состояния земляного полотна железной дороги в виде насыпи высотой 15 м из песка средней крупности в ходе сейсмического воздействия различной балльности. Установлено различие результатов расчетов напряженно-деформированного состояния насыпи в рассматриваемых моделях по критериям перемещения основной площадки земляного полотна и напряжений в зоне формирования поверхности скольжения.

Доказано, что модель упрочняющегося грунта с жесткостью при малых деформациях наиболее подходит для исследования влияния сейсмического воздействия на напряженно-деформированное состояние земляного полотна железной дороги.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние грунта, сейсмическое воздействие, численное моделирование, модель грунта, демпфирование

Для цитирования: Меркуров Ю. С., Колос А. Ф. Обоснование выбора модели грунта для исследования стабильности земляного полотна железной дороги при сейсмическом воздействии // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 3 (75). С. 66–77. DOI 10.52170/1815-9265_2025_75_66.

Original article

Rationale for the choice of a soil model for studying the stability of railway subgrade under seismic impact

Yury S. Merkuryev^{1✉}, Alexey F. Kolos²

¹ Lengiprostroy, Saint Petersburg, Russia

² Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, Russia

¹ merku50@mail.ru[✉]

² kolos@pgups.ru

Abstract. The problem of numerical modeling of the stress-strain state of a soil structure taking into account seismic impact is considered. Justification of the choice of a soil model that ensures correct modeling of seismic impact on a railway embankment for the subsequent development of measures to increase the seismic resistance of the subgrade by using damping layer.

Based on the analysis of the graphs of the dependence of axial deformation on the stress deviator, the main differences between some soil models (linear elastic, Mohr-Coulomb, hardening soil and hardening soil with stiffness at small deformations) and the features of their operation under dynamic cyclic impact are analyzed. The stress-strain state of a railway roadbed in the form of a 15 m high embankment made of medium-sized sand was simulated during seismic impacts of varying intensity.

The finite element method is used to simulate standard stabilometric and compression tests to analyze the dependence of axial deformations on stresses. The obtained calculation graphs are assessed for compliance with theoretical curves and laboratory test data.

The difference in the results of calculations of the stress-strain state of the medium-sized sand embankment in the considered models was established according to the following criteria: displacement of the subgrade surface, stress in the zone of formation of the sliding surface.

It was proven that the soil model with stiffness at small deformations is the most suitable among considered for studying the influence of seismic action on the subgrade stress-strain state.

Keywords: stress-strain state, seismic impact, numerical modeling, soil model, damping

For citation: Merkuryev Yu. S., Kolos A. F. Rationale for the choice of a soil model for studying the stability of railway subgrade under seismic impact. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(75):66–77. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_75_66.

Введение

Грунт – материал, характеризующийся нелинейной зависимостью деформаций от напряжений. При действии сейсмической нагрузки необходимо учитывать не только нелинейные свойства грунта, но и фактор попрерменного чередования этапов приложения и снятия нагрузки.

Для анализа напряженно-деформируемого состояния (НДС) грунта, характеризуемого большой деформацией на границе разрушения [1], эффективным является один из численных методов расчетов – метод конечных элементов (МКЭ). Благодаря данному методу можно получать полноценную картину распределения напряжений, деформаций, скоростей, ускорений и других параметров по поперечному сечению в любой момент землетрясения.

Для численного моделирования нелинейного поведения грунтовых массивов используются различные модели материалов, выбор которых определяется рядом факторов: типом грунта, видом сооружения, характером нагружения и др. В настоящей работе приводится анализ следующих моделей: линейно-упругой (Linear Elastic, LE), линейной упруго-идеально-пластической Мора – Кулона (Mohr-Coulomb, MK), упрочняющегося грунта (Hardening Soil, HS), упрочняющегося грунта с жесткостью при малых деформациях (Hardening Soil Small, HSS).

С помощью расчетов МКЭ в программном комплексе Plaxis 3D производится моделирование стабилометрического испытания. Показано, что смоделированные графики зависимости осевой деформации от действующей нагрузки коррелируют с теоретическими кривыми, получаемыми в виртуальной лаборатории SoilTest, и данными реальных лабораторных испытаний. Приводятся результаты те-

стовых примеров расчетов в плоской постановке в программе Plaxis 2D параметров НДС земляного полотна (ЗП) железной дороги с учетом сейсмического воздействия с использованием рассматриваемых моделей грунтов.

В выводах выделены ключевые различия исследованных моделей материалов, используемых для моделирования грунта. Обосновывается выбор модели упрочняющегося грунта с жесткостью при малых деформациях для моделирования НДС ЗП в процессе землетрясения.

Материалы и методы исследования

Для описания принципов работы упомянутых моделей материалов [2] в динамических расчетах при моделировании землетрясений сначала рассмотрим особенности работы моделей в целом и в ходе стабилометрического испытания в частности.

Преимуществом модели LE, моделирующей линейное развитие полностью обратимых деформаций, является ее простота, что определяет скорость вычислений. Недостатками данной модели являются ее линейность и отсутствие критерия прочности. Поскольку грунт отличается нелинейным поведением и необратимыми деформациями, модель LE некорректно применять для моделирования НДС ЗП железной дороги во время землетрясения, так как высвобождение энергии землетрясения происходит в том числе за счет ее перехода в пластические деформации.

Модель MK, в дополнение к линейной модели, характеризуется идеально-пластическим течением, моделируемым после достижения напряженного состояния в рассматриваемой точке критерия разрушения Мора – Кулона. Преимуществом данной модели перед моделью LE является возможность моделирования пластических деформаций, что при динамическом нагружении приводит к демп-

фированию. Недостаток данной модели состоит в том, что сохраняется ее линейное поведение в пределах участков нагружения и разгрузки.

Модель HS обладает существенным преимуществом над линейными моделями MK и LE в виде гиперболической зависимости жесткости грунта от напряжений после начала формирования сдвиговых деформаций. При динамическом нагружении модель HS моделирует пластические деформации при достижении прочности грунта (упрочнении при сдвиге) или при повышении напряжения в грунте при предварительном уплотнении (упрочнении при сжатии), что, соответственно, приводит к демпфированию. Недостатком данной модели является линейность ветви разгрузки и повторной нагрузки, что не соответствует реальному поведению грунта. Данный фактор важен для моделирования процесса гистерезиса – одного из явлений, обуславливающих затухание колебаний в ходе сейсмического воздействия на грунтовое сооружение.

Модель HSS, в отличие от модели HS, показывает статический гистерезис на стадии разгрузки и повторного нагружения. Размер петли гистерезиса зависит от амплитуды приложенной нагрузки и соответствующей амплитуды деформации. В данной модели на этапе разгрузки и повторной нагрузки за счет образования дополнительных деформаций энергия внешнего воздействия частично переходит во внутреннюю потенциальную энергию материала [3], т. е. на взаимное трение частиц и нагрев. В итоге гистерезисное поведение в модели HSS приводит в динамических расчетах к дополнительному затуханию колебаний, т. е. к дополнительному демпфированию. Кроме того, она моделирует процесс деградации модуля сдвига по мере роста деформаций, что также влияет на результатирующую картину НДС в расчетной схеме. Недостатком данной модели является необходимость определения наибольшего среди рассмотренных моделей числа параметров грунта и низкая скорость расчета в программном средстве, преимуществом – наибольшее соответствие реальному поведению грунта в динамическом расчете.

Приведем краткие выводы относительно поведения рассмотренных моделей в расчете НДС и в динамических расчетах.

В ходе статического нагружения рассмотренные модели проявляют различное поведение. Большее число вводимых параметров позволяет достичь большего соответствия реальному поведению грунта в процессе приложения и снятия нагрузки.

В соответствии с представленным выше описанием модель LE может подойти только для задач нагружения до достижения критерия прочности. Модель MK подходит для задач нагружения с достижением критерия прочности и разрушением, но где не требуется моделировать разгрузку, так как при разгрузке областей, не вышедших в предельное состояние, модель показывает неправдоподобно большое восстановление деформаций. Модель HS моделирует нелинейную зависимость деформаций от прикладываемой нагрузки, но снятие нагрузки и ее повторное приложение происходит по линейному закону. Наиболее близкая к реальному поведению грунта среди рассмотренных – модель HSS с нелинейным поведением как при приложении нагрузки, так и при ее снятии, что наиболее полно отражает работу грунта в ходе циклического воздействия, которым является землетрясение.

Обозначенные выше положения подтверждаются путем моделирования испытаний методом трехосного сжатия с разгрузкой и повторным нагружением. По результатам смоделированных опытов построены графики зависимости осевых деформаций образца грунта от девиаторного напряжения. Далее полученные графики сравниваются с данными реальных испытаний, а также с данными виртуальной лаборатории SoilTest.

С учетом обозначенных различий моделей в ходе статического нагружения выдвигаются следующие предположения, которые проверяются в ходе динамических расчетов железнодорожной насыпи:

1. Модели MK и LE моделируют одинаковое по величине затухание при низкой интенсивности землетрясения. При повышенной интенсивности в модели MK начинается пластическое течение. Данный процесс является реализацией перехода кинетической энергии сейсмической волны в необратимое смещение точек конструкции, т. е. поглощение энергии, что в итоге приводит к меньшим деформациям.

2. В моделях HS и HSS вследствие проявления процесса разупрочнения грунта, сопровождающего нагружение, происходит большее поглощение колебаний по сравнению с линейными моделями MK и LE.

3. В модели HSS за счет гистерезисного поведения грунта получается отличное от модели HS поглощение. Данное отличие зависит от соотношения параметров модуля сдвига G_0 с модулем разгрузки E_{ur} , а также от амплитуды прикладываемой нагрузки (т. е. от интенсивности землетрясения).

Проанализируем параметры сравнения НДС недемпифицированной насыпи, моделируемой различными моделями грунтов.

Различие в результатах расчетов параметров НДС позволяет подчеркнуть важность выбора модели грунта для проведения динамического анализа НДС земполотна совместно с проверкой его устойчивости с учетом сейсмической силы. Динамический анализ НДС земполотна в данном случае подразумевает под собой оценку жесткости конструкции насыпи и, соответственно, оценку безопасности движения подвижного состава по конструкции насыпи железнодорожного пути (ЖДП) при землетрясении.

Первым параметром сравнения НДС (критерием жесткости) является перемещение верха конструкции насыпи – основной площадки ЗП (ОПЗП). Само по себе оно не может вызывать разрушения всей конструкции насыпи. Но при землетрясении подвижной состав во время движения может опрокинуться за счет действия горизонтальных сил, действующих как на конструкцию ЖДП, так и на поезд.

В работе [4] произведен анализ вероятности схода поезда с рельсов в зависимости от его скорости и наличия сейсмической силы. Критерием безопасности при этом является коэффициент схода поезда с рельсов. Данный параметр принят Международным союзом железных дорог [5] и отражает соотношение сил, удерживающих состав на пути (вес вагона, трение колеса о головку рельса и др.), и сил, способных сместить состав с рельсошпальной решетки (центробежная сила при прохождении кривой, дополнительная сила инерции от землетрясения). Коэффициент схода поезда с рельсов существенно возрастает с увеличением перемещений головки рельса, которые допустимо принять равными перемещениям ОПЗП в силу близости к головке рельса и большой жесткости конструкции верхнего строения пути. Большие перемещения в уровне ОПЗП говорят о большой дополнительной горизонтальной силе в данном сечении, что влияет на устойчивость состава на пути.

Вторым параметром сравнения расчетных случаев (критерием прочности) является напряжение в точках формирования поверхностей скольжения с обеих сторон насыпи. По аналогии с перемещением достижение какого-то конкретного значения, превышающего предел прочности грунта, не означает полного разрушения конструкции. Тем не менее данный параметр является основным для описания НДС конструкции ЗП. И чем напряжение в конкретной точке выше, тем выше вероятность сдвига грунта в данной точке и последующее обрушение по поверхности скольжения.

Исходные характеристики материала земляного полотна и основания

Наименование показателя	Величина показателя	Наличие показателя в модели			
		LE	MK	HS	HSS
Удельный вес грунта γ , кН/м ³	18,0	+	+	+	+
Коэффициент Пуассона ν , д. е.	0,20	+	+	+	+
Модуль деформации E_{def} , МПа	7,65	+	+	-	-
Одометрический модуль E_{oed} , МПа	8,5	+	+	+	+
Секущий модуль деформации E_{50} , МПа	16,8	-	-	+	+
Угол внутреннего трения φ_{ef} , град	34,6	-	+	+	+
Удельное сцепление грунта, c_{ef} , кПа	12,0	-	+	+	+
Угол дилатансии ψ , град	4,1	-	+	+	+
Модуль разгрузки E_{ur} , МПа	134,2	-	-	+	+
Модуль сдвига G_0 , МПа	200	-	-	-	+
Деформации снижения модуля сдвига до значения $0,7G_{0,7}$, д. е.	$1 \cdot 10^{-3}$	-	-	-	+

Результаты исследования

В качестве исследуемого грунта принят песок, основные характеристики которого представлены в табл. 1. Для отражения поведения математических моделей в ходе статического нагружения сначала моделируется стабилометрическое испытание грунтового образца диаметром 38 мм и высотой 76 мм в соответствии с ГОСТ 12248.3–2020 [6]. Моделирование производится в трехмерной постановке в программном комплексе Plaxis 3D, расчетная схема представлена на рис. 1. Трехосное испытание производится по схеме: всестороннее обжатие до 50 кПа, нагрузка до девиатора 150 кПа, разгрузка до девиатора 5 кПа и повторная нагрузка до разрушения. Испытание проходит с возможностью бокового расширения образца, т. е. его боковые поверхности не зафиксированы в расчетной схеме.

На рис. 2–4 совмещены графики зависимости относительной вертикальной деформации

ε_z от девиаторного напряжения q , полученные путем реального стабилометрического испытания песков средней крупности Московского региона, пространственного моделирования испытания в Plaxis 3D и из виртуальной лаборатории SoilTest. График реального испытания является неким эталоном, с которым сравниваются графики ручного моделирования и заведенной в Plaxis идеальной математической закономерности с неоткалиброванными параметрами грунта.

График модели LE (см. рис. 2, а) уходит в бесконечность вне зависимости от нагрузки и деформации. График модели MK (см. рис. 2, б) до девиатора в 175 кПа, с учетом разгрузки и повторной нагрузки, представляет собой практически прямую линию. Далее после деформации 0,022 происходит пластическое течение до деформации 0,026, при которой расчет останавливается. В моделях HS и HSS (рис. 3 и 4) отражается нелинейная взаимосвязь деформаций и

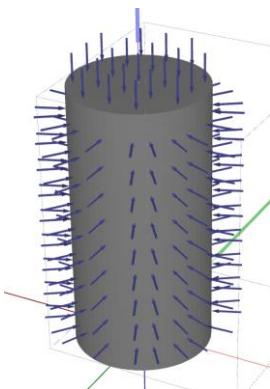


Рис. 1. Расчетная схема стабилометрического испытания, выполненная в программе Plaxis 3D

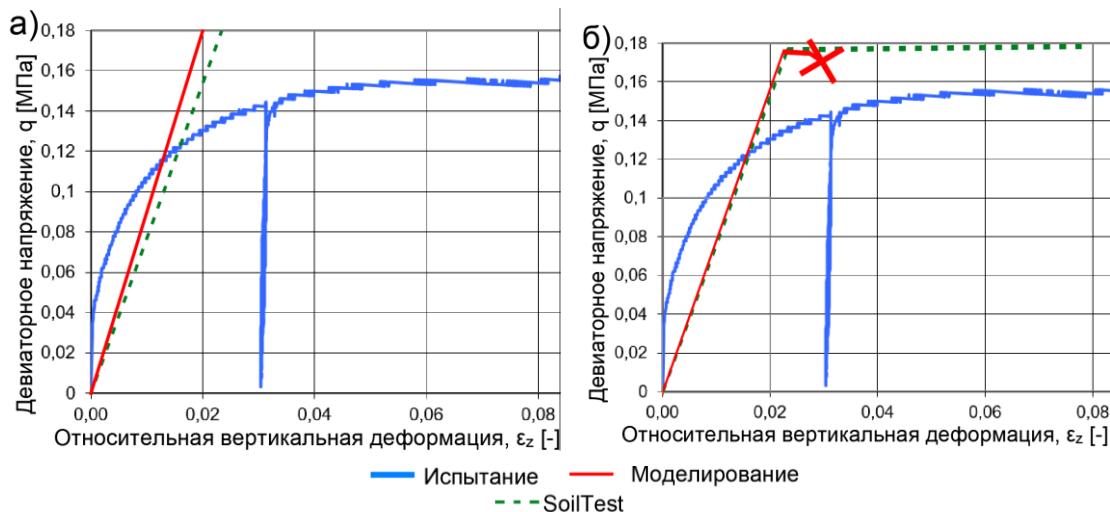


Рис. 2. Графики зависимости осевой деформации грунтового образца от девиатора напряжений при реальном испытании, при расчетном моделировании в моделях LE (а) и MK (б) и в виртуальной лаборатории SoilTest для тех же моделей

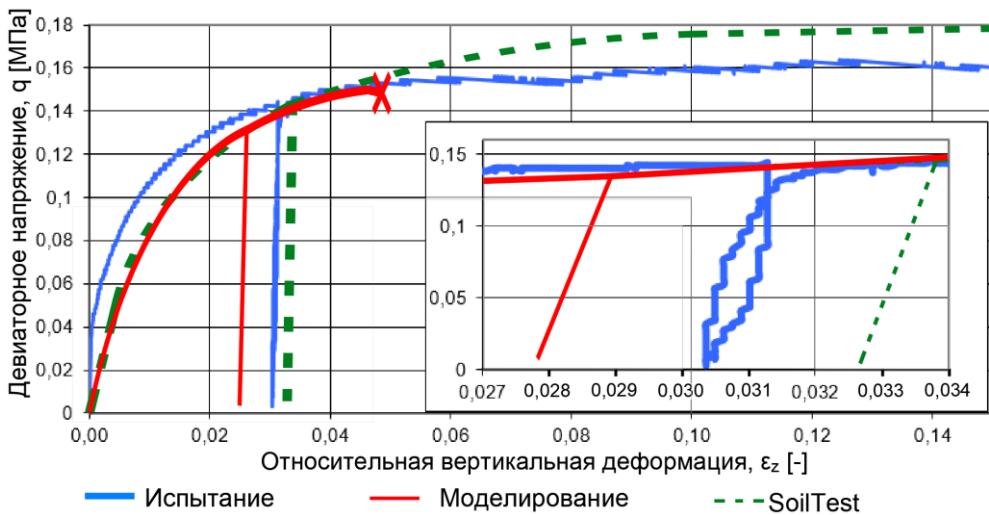


Рис. 3. Графики зависимости осевой деформации грунтового образца от девиатора напряжений при реальном испытании, при расчетном моделировании в модели HS и в виртуальной лаборатории SoilTest для той же модели

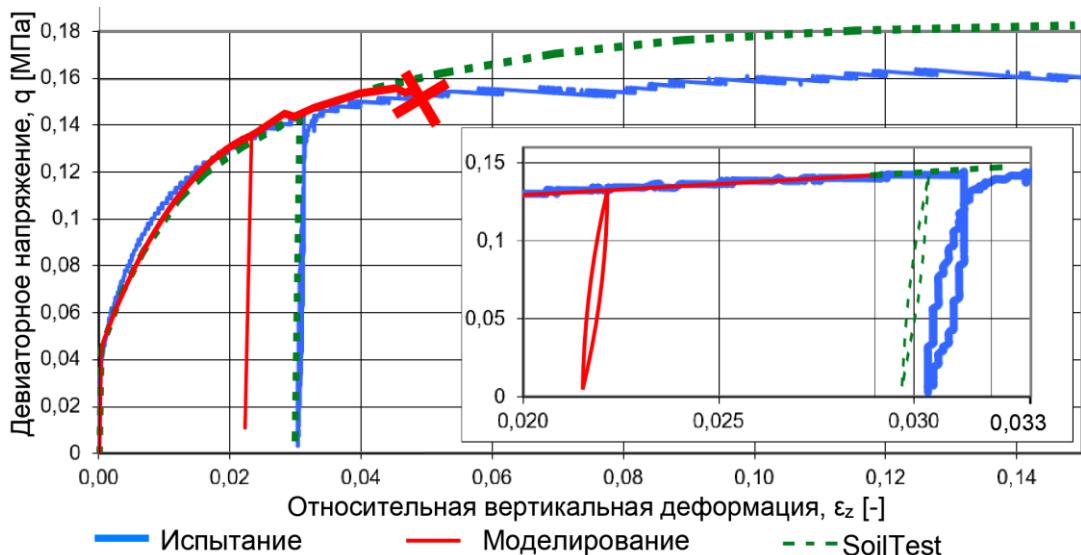


Рис. 4. Графики зависимости осевой деформации грунтового образца от девиатора напряжений при реальном испытании, при расчетном моделировании в модели HSS и в виртуальной лаборатории SoilTest для той же модели

девиатора, что говорит о постепенном снижении модуля деформации (разуплотнении в силу бокового расширения образца) по мере увеличения нагрузки вплоть до остановки расчета при деформациях порядка 0,05. В моделях HS и HSS ветви разгрузки и повторной нагрузки отклонены от линии первичного нагружения, но в модели HS они проходят по одной траектории, а в HSS видна гистерезисная петля.

Сравнение представленных графиков позволяет сделать вывод о том, что моделирование стабилометрического нагружения в моделях HS и HSS производится более корректно, чем в мо-

делях LE и МК. После начала формирования сдвиговых деформаций (при $q \approx 40$ кПа) графики в моделях HS и HSS имеют криволинейную форму, что говорит о снижении модуля деформации в процессе девиаторного нагружения. В модели HSS видна петля на ветви разгрузки, что соответствует данным реальных лабораторных испытаний.

Таким образом, представленные выше теоретические выкладки о поведении моделей грунта подтверждаются корреляцией расчетных данных, полученных посредством численного моделирования, и данных, полученных в ходе реальных лабораторных экспериментов.

Далее приведем результаты расчетов конструкции недемпфированной грунтовой насыпи (рис. 5) высотой 15 м с бермами шириной 4 м и крутизной откосов 1:1.5 – 1:1.75 – 1:2. Мощность и ширина основания (массив грунта, подстилающий ЗП) приняты 30 и 100 м соответственно. Размеры расчетной схемы были обоснованы в работе автора [7]. Верхнее строение пути и подвижной состав заданы фиктивными столбиками материалов, что необходимо для корректного моделирования колебаний конструкции ЖДП в отличие от моделирования этих же элементов расчетной схемы в виде эквивалентных нагрузок.

На расчетной схеме (см. рис. 5) отражены изоповерхности полной девиаторной деформации, которые показывают положение потенциальных поверхностей скольжения в момент времени в средней части акселерограммы ($t = 6,0$ с). Согласно этим данным выбраны точки для измерения напряжений.

Землетрясение моделировалось через синтезированные акселерограммы, полученные в программе ГЕО5 МКЭ [7] с вводом ускорения в уровне основания. Для землетрясений интенсивностью 7, 8 и 9 баллов, в соответствии

с рекомендациями п. 5.2.2 СП14 [8], принимались значения 1, 2 и 4 м/с² соответственно.

В продолжение работы [9], где коэффициент устойчивости рассчитывался по методу Шахунянца, закрепленному в СП238 [10], приведем результаты псевдостатического анализа устойчивости при землетрясении разной балльности через задание горизонтальной компоненты объемной силы в долях от собственного веса. Разница между коэффициентами устойчивости, рассчитанными по моделям МС, HS и HSS, проявляется в тысячных долях (табл. 2).

Приведенные данные указывают на то, что вне зависимости от используемой модели по классическому критерию – коэффициенту устойчивости отличий нет. Отсутствие разницы в получаемых коэффициентах определяется сутью расчета методом снижения прочностных характеристик [11], которые во всех моделях одинаковы. Прогноз разрушения по данному методу осуществляется путем одновременного пошагового понижения обоих показателей сдвиговой прочности (трения и сцепления) до разрушения рассчитываемой конструкции. Снижение прочностных показателей производится делением на коэффициент снижения прочности

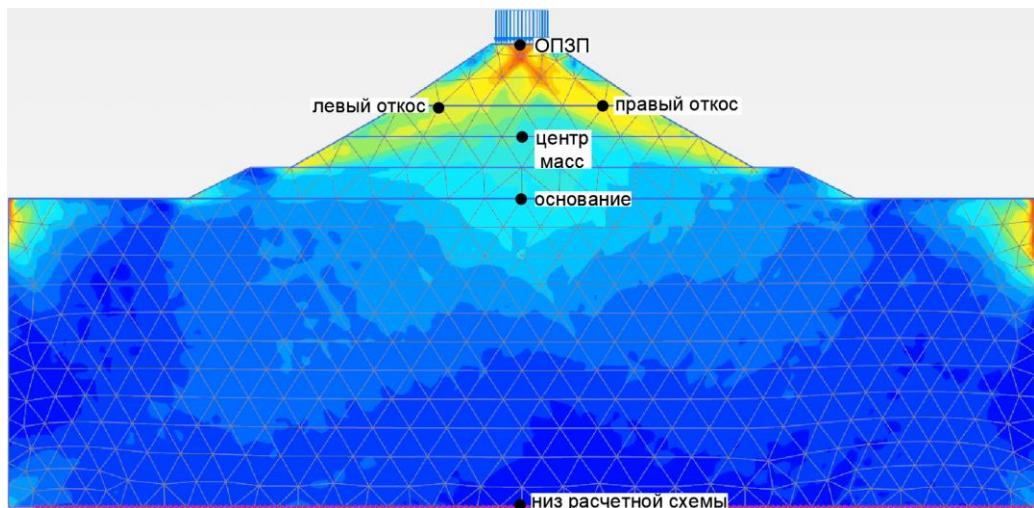


Рис. 5. Изоповерхности полной девиаторной деформации в насыпи и основании с изображением положения точек измерения

Значение коэффициентов устойчивости насыпи в зависимости от метода расчета, модели грунта и интенсивности землетрясения

Интенсивность землетрясения, баллы	Значение горизонтальной составляющей k_h	Значение коэффициента устойчивости			
		МКЭ Plaxis			
		Аналитический метод ГЕО5 Шахунянц	LE	МК	HS
0 (без сейсмики)	0	1,28	–	1,293	1,298
7	0,025	1,21	–	1,235	1,240
8	0,05	1,15	–	1,189	1,185
9	0,1	1,04	–	1,096	1,096

(он же коэффициент устойчивости в момент разрушения). Поскольку показатели сдвиговой прочности во всех моделях одинаковы, получаем идентичные итоговые результаты. Вместе с тем расчетные данные по МКЭ схожи с коэффициентами устойчивости, рассчитанными по соотношению удерживающих и сдвигающих откос сил.

Однако оценка надежности конструкции насыпи в условиях сейсмического воздействия не должна ограничиваться только определением коэффициента устойчивости. Колебания отдельных точек, происходящие во время землетрясения, даже при сохранении устойчивости конструкции оказывают существенное влияние на безопасность движения. Так, при определенных величинах перемещений ОПЗП возможно опрокидывание состава [4]. Модель грунта, задаваемая в расчете, существенно влияет на итоговое значение перемещений, которые, в свою очередь, будут являться критерием безопасности.

В ходе численного моделирования сейсмического воздействия на ЗП были получены значения и построены графики абсолютных (перемещения относительно исходного состояния, соответствующего началу землетрясения, т. е. в нулевой момент времени по акселерограмме) горизонтальных перемещений основных точек системы: ОПЗП, основания и низа расчетной схемы (рис. 6). Также были собраны данные по значениям полного главного

напряжения σ_1 в точках формирования поверхностей скольжения.

Следует отметить, что в настоящей работе не рассматриваются вертикальные перемещения по следующим причинам: во-первых, акселерограмма не содержит вертикальной компоненты; во-вторых, влияние на устойчивость является двунаправленным, т. е. на одни отсеки поверхности скольжения дополнительная вертикальная инерция от землетрясения оказывает сдвигающее воздействие, а на другие – удерживающее [7, 9]; в-третьих, влияние на сохранность состава на пути также двунаправленно: с одной стороны, негативный эффект будет наблюдаться при «оседании» под поездом рельсошпальной решетки (РШР) и, соответственно, ослаблении силы, прижимающей колесную пару к рельсу, с другой – наоборот: «поднятие» РШР будет способствовать более плотному прижатию колесной пары к рельсам.

Графики зависимости абсолютных горизонтальных перемещений элементов расчетной схемы (ОПЗП, основания, низа расчетной схемы) от времени по акселерограмме (сейсмограммы) для исходной недемпифицированной конструкции при стандартных параметрах (см. табл. 1) в различных моделях грунта приведены на рис. 6.

На сейсмограммах (см. рис. 6) отчетливо видна разрозненность фаз колебаний насыпи относительно основания в линейных моделях

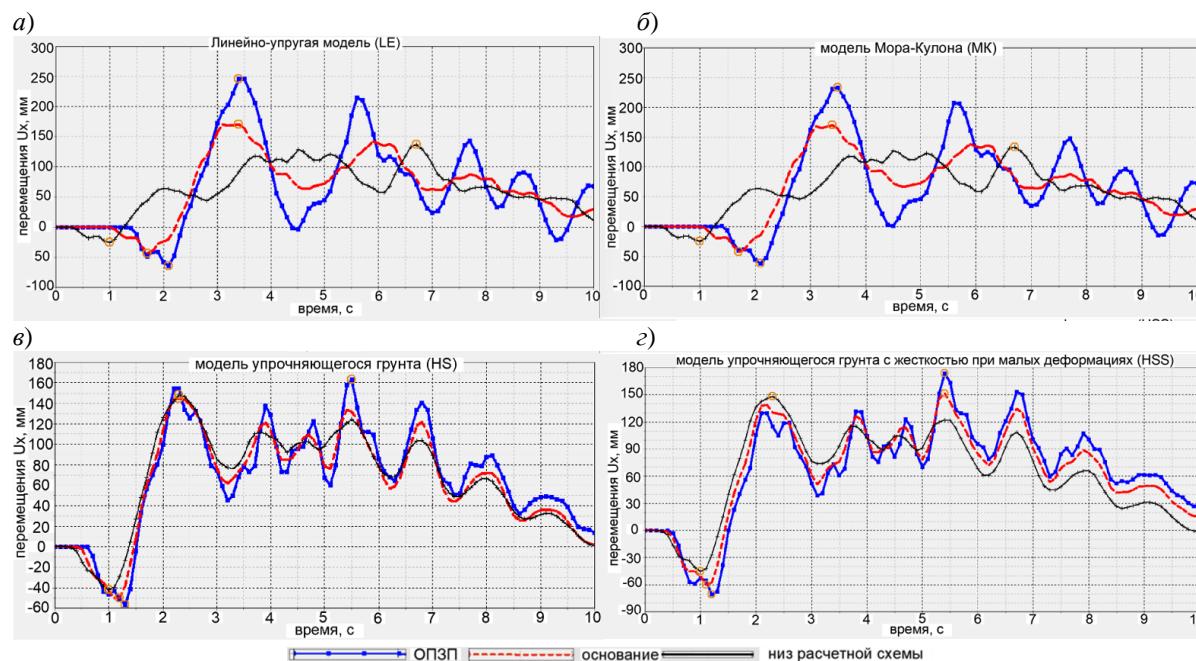


Рис. 6. Сейсмограммы элементов исходной расчетной схемы в моделях:
а – LE ; б – МК ; в – HS; г – HSS

LE и MK и совпадение фаз в моделях упрочняющегося грунта HS и HSS. То есть в последних моделируется меньшая подвижность тела насыпи относительно основания.

Первичные результаты расчетов НДС недемптированной с учетом сейсмического воздействия различной интенсивности в рассматриваемых моделях LE, MK, HS и HSS приведены в табл. 3. Положительные значения соответствуют перемещениям в правую сторону от оси сооружения, отрицательные – в левую.

Максимальные относительные перемещения ОПЗП рассчитывались как разность между абсолютным перемещением ОПЗП и абсолютным перемещением основания в каждый отдельный момент времени. Соответственно, относительное перемещение основания как разность между абсолютным перемещением основания и абсолютным перемещением низа расчетной схемы.

По первичным данным относительных перемещений ОПЗП и основания рассчитывались амплитуды перемещений (табл. 4), по которым производится представленный ниже анализ колебаний.

По результатам анализа графиков, изображенных на рис. 6, и соответствующих значений перемещений (см. табл. 4) видно, что наибольшие относительные перемещения в уровне основания моделируются моделями LE и MK. При наивысшем уровне интенсивности в модели MK перемещение немного меньше, чем в модели

LE, что подтверждает первое выдвинутое выше предположение.

С учетом мощности слоя основания 30 м видно, что модели HS и HSS показывают меньшую величину перемещений. Это говорит об изначально большем затухании колебаний в этих моделях, что объясняется снижением модуля деформации $E_{\text{деф}}$ в ходе нагружения с возможностью бокового расширения и, соответственно, большем демпфировании в результате больших пластических деформаций. Это подтверждает второе предположение.

В моделях HS и HSS, в отличие от моделей LE и MK, в завершении землетрясения визуально прослеживается большее совпадение фаз графиков абсолютных перемещений в точках измерения, что говорит о большей «цельности» расчетной схемы в более совершенных моделях. Также стоит отметить и наибольшее остаточное перемещение величиной в 30 мм в модели HSS по завершении землетрясения и в целом сохранение пластической деформации, начиная с середины акселерограммы (т. е. с момента начала снижения интенсивности сейсмического воздействия). Тем самым подтверждено третье предположение о различии поглощения в моделях HS и HSS.

Для приведенных на рис. 5 точек в откосных частях собраны данные по значениям полных главных напряжений. На рис. 7 приведены зависимости полных главных напряжений в правом и левом откосе насыпи от времени по акселерограмме.

Таблица 3

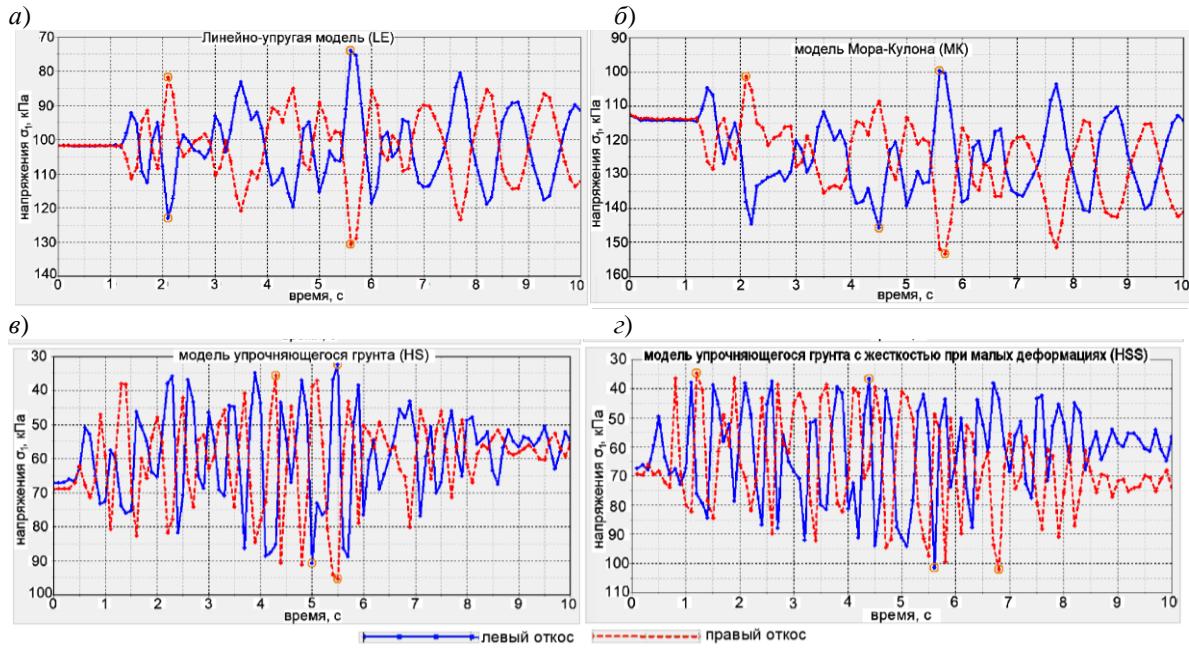
Максимальные относительные перемещения в конструкции ЗП в зависимости от интенсивности землетрясения и модели грунта, мм

Перемещение	Интенсивность, баллы											
	7				8				9			
	LE	MK	HS	HSS	LE	MK	HS	HSS	LE	MK	HS	HSS
ОПЗП	28 -16	28 -16	5 -9	3 -3	48 -39	46 -40	14 -10	6 -8	95 -78	91 -80	31 -24	23 -29
В уровне основания	29 -21	28 -20	4 -7	4 -3	54 -47	52 -47	8 -14	6 -11	110 -93	106 -93	18 -31	29 -32

Таблица 4

Амплитуды перемещений в конструкции ЗП в зависимости от интенсивности землетрясения и модели грунта, мм

Амплитуда перемещения	Интенсивность, баллы											
	7				8				9			
	LE	MK	HS	HSS	LE	MK	HS	HSS	LE	MK	HS	HSS
ОПЗП	44	44	14	6	87	86	24	14	173	171	55	52
В уровне основания	50	48	11	7	101	99	22	17	203	199	49	61



Rис. 7. Зависимости полных главных напряжений в теле земполотна от времени по акселерограмме в моделях:
а – LE; б – MK; в – HS; г – HSS

Поскольку сейсмическое воздействие является циклическим, то в откосах также циклически происходит изменение напряжений. Данное поведение практически симметрично относительно исходного напряжения. По завершении землетрясения напряжение возвращается в исходное значение во всех моделях грунта.

В модели HS, в отличие от моделей LE и MK, в завершении землетрясения прослеживается снижение амплитуды колебаний напряжений относительно средней части акселерограммы. При этом в модели HSS график имеет существенно отличающийся вид: количество перепадов напряжений заметно больше, т. е. следует предположить, что структура модели грунта более жесткая и реагирует чаще на смену направления сейсмического воздействия.

Выводы

Простейшие линейные модели LE и MK не позволяют моделировать некоторые особенности грунта (способность к уплотнению и разуплотнению, нелинейную зависимость деформаций от действующих нагрузок), которые необходимо учитывать при расчете конструкции на циклическое динамическое воздействие, которым является землетрясение.

Модель HSS, в дополнение к модели HS, моделирует нелинейное поведение на всех этапах

нагружения как при снятии нагрузки, так и при повторном нагружении, что существенно в моделировании НДС при землетрясении.

Указанные особенности важны при расчете грунтового сооружения на сейсмическое воздействие, в процессе которого попаременно сменяются стадии приложения и снятия нагрузки, на каждом из этапов действия нагрузки должен действовать нелинейный закон деформирования.

На основе различий моделей в характере зависимости деформации от нагрузки были выдвинуты предположения о потенциале каждой модели поглощать колебания. Критерием оценки при этом служили значения перемещений в уровне ОПЗП и напряжения в зоне формирования поверхности скольжения. Выдвинутые предположения частично подтвердились и требуют дополнительного изучения, возможно, с точки зрения показателей энергии.

В настоящей работе продемонстрирована возможность проведения динамического анализа НДС ЗП во время землетрясения. Показано, что, с одной стороны, коэффициент устойчивости, получаемый в псевдостатическом расчете в каждой из моделей, одинаков. С другой стороны, используемая модель и динамические параметры грунта насыпи существенно влияют на значения перемещений

ОПЗП во время землетрясения, которые косвенно являются показателями вероятности схода поезда с рельсов.

На основе выполненных расчетов стабилометрического испытания и НДС недемпифицированной насыпи следует считать обоснованным применение модели упрочняющегося грунта с жесткостью при малых деформациях для исследования процессов демпфирования сейсмического воздействия и последующей разработки мероприятий для повышения сейсмоустойчивости насыпей. В данной модели наиболее полно и корректно учитываются ключевые свойства грунта, необходимые для моделирования землетрясения.

Перспективными направлениями исследований в свете рассмотренного материала являются:

1. Моделирование НДС ЗП железной дороги с учетом сейсмического воздействия с помощью модели упрочняющегося грунта с жесткостью при малых деформациях для изучения стабильности ЗП в процессе землетрясения и последующего поиска методов повышения сейсмоустойчивости.

2. Экспериментальные исследования зависимости деформации грунтовых образцов от параметров динамической нагрузки и от физико-механических параметров грунтов для определения соответствия результатам численного моделирования в различных моделях.

Список источников

1. Ишихара К. Поведение грунтов при землетрясениях / науч. ред. рус. пер.: А. Б. Фадеев, М. Б. Лисюк ; пер. с англ. Н. Л. Курчанов. В. А. Клименко. Санкт-Петербург : [б. и.], 2006. 383 с. (Серия «Достижения современной геотехники» / НПО «Геореконструкция-Фундаментпроект»).
2. Пособие по моделям материалов. PLAXIS CONNECT Edition V20. URL: https://bentleysystems.servicenow.com/community?id=kb_article_view&sysparm_article=KB0108423 (дата обращения: 04.03.2025).
3. Мирный А. Ю., Мосина А. С. Математические модели грунтов для инженеров : монография. Москва : Геоинфо, 2024. 416 с.
4. Vibration of subgrade and evaluation of derailment coefficient of train under combined earthquake – moving train load / M. Gao, X. Xu, R. He [et al.] // Soils and Foundations. 2021. Vol. 61, Iss. 2. P. 386–400. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.12.005>.
5. Yi S. R. Dynamic Analysis of High-Speed Railway Alignment. 2018. URL: <https://www.researchgate.net/publication/323110972> (дата обращения: 04.03.2025).
6. ГОСТ 12248.3–2020. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия. Москва : Стандартинформ, 2020. 28 с.
7. Меркуьев Ю. С. Моделирование сейсмического воздействия на земляное полотно с демпфирующим слоем. Динамический расчет по акселерограмме // Вестник УрГУПС. Екатеринбург. 2023. № 4. С. 110–119.
8. СП14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах : актуализированная редакция СНиП II-7-81*. Москва : Стандартинформ, 2018. 116 с.
9. Меркуьев Ю. С. Моделирование сейсмического воздействия на земляное полотно с демпфирующим слоем. Сравнение аналитического и конечно-элементного методов // Вестник УрГУПС. Екатеринбург. 2023. № 3. С. 122–134.
10. СП238.1326000.2015. Железнодорожный путь. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200124323> (дата обращения: 04.03.2025).
11. Федоренко Е. В. Метод расчета устойчивости путем снижения прочностных характеристик // Транспорт Российской Федерации. 2013. № 6 (49) С. 24–26.

References

1. Ishihara K. Soil behavior during earthquakes. Translated from English. Edited by A. B. Fadeev, M. B. Lisyuk. St. Petersburg. Series ‘Achievements of modern geotechnics’. NPO ‘Georekonstruktsiya-Fundament-Proekt’. 2006. 384 p. (In Russ.).
2. Manual on material models. PLAXIS CONNECT Edition V20. (In Russ.). URL: https://bentleysystems.servicenow.com/community?id=kb_article_view&sysparm_article=KB0108423.
3. Mirny A. Yu., Mosina A. S. Mathematical Models of Soils for Engineers. Monograph. Moscow: Geoinfo; 2024. 416 p. (In Russ.).
4. Gao M., Xu X., He R. [et al.]. Vibration of subgrade and evaluation of derailment coefficient of train under combined earthquake moving train load. *Soils and Foundations*. URL: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.12.005>.

5. Yi S. R. Dynamic Analysis of High-Speed Railway Alignment. 2018. Southwest Jiao Tong University Press, 73–108.
6. GOST 12248.3–2020. Determination of strength and deformability characteristics by the triaxial compression method. Standartinform; 2020. (In Russ.).
7. Merkuryev Yu. S. Modeling of seismic impact on a roadbed with a damping layer. Dynamic calculation based on accelerogram. *Bulletin of the Ural State Transport University*. Yekaterinburg. 2023. No. 4. (In Russ.).
8. SP14.13330.2018. Construction in seismic areas. Moscow: Standartinform; 2018. (In Russ.).
9. Merkuryev Yu. S. Modeling of seismic impact on the roadbed with a damping layer. Comparison of analytical and finite element methods. *Bulletin of the Ural State Transport University*. Yekaterinburg. 2023;(3):122–134. (In Russ.).
10. SP238.1326000.2015. Railway track. (In Russ.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200124323>.
11. Fedorenko E. V. Method for calculating stability by reducing strength characteristics. *Transport of the Russian Federation*. 2013;(49):24–26. (In Russ.).

Информация об авторах

Ю. С. Меркуров – ведущий инженер-проектировщик отдела путей и сооружений АО «ЛенгипроПрострой».
А. Ф. Колос – доктор технических наук, проректор по экономике и информатизации, доцент кафедры «Строительство дорог транспортного комплекса» Петербургского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

Yu. S. Merkuryev – Leading Design Engineer of the Tracks and Structures Department, Lengiprostroy.

A. F. Kolos – Doctor of Engineering, Vice-Rector for Economics and Informatization, Associate Professor of the Road Construction Transport Complex Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University.

Статья поступила в редакцию 14.03.2025; одобрена после рецензирования 29.04.2025; принята к публикации 11.09.2025.

The article was submitted 14.03.2025; approved after reviewing 29.04.2025; accepted for publication 11.09.2025.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 625.421

doi:10.52170/1815-9265_2025_75_78

К вопросу обоснования увеличения срока эксплуатации рельсов в метрополитене

Алексей Леонидович Ланис¹, Дмитрий Андреевич Усов², Виктор Александрович Тархов^{3✉}

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

¹alangeo@bk.ru

²usovda96@yandex.ru

³tarhovvictory@yandex.ru✉

Аннотация. В статье рассматривается состояние рельсов, пропустивших нормативный тоннаж в метрополитене. При проведении натурного обследования и диагностики с помощью методов неразрушающего контроля выполнена оценка фактического состояния рельсов. Самыми распространенными стали дефекты первой группы – выкрашивание и отслоение металла, параметры которых оказались допустимыми для дальнейшей эксплуатации.

По результатам анализа материалов, предоставленных метрополитеном, и применения методики назначения ремонта ОАО «РЖД» получены зависимости, которые описывают появление дефектов и отказы от пропущенного тоннажа. Дефектность была исключена из факторов оценки из-за незначительного влияния на назначение сплошной смены рельсов. В свою очередь, одиночные выходы рельсов оказали влияние на определение срока окончания эксплуатации рельсов, который наступит не ранее чем через 10 лет с момента проведения исследования.

Для проверки достоверности полученных результатов оценивалась надежность рельсов в метрополитене. В расчете времени эксплуатации скорректировано условие наработки, тем самым применение методики, основанной на теории надежности, стало возможным по отношению к условиям метрополитена. С помощью расчета удалось определить вероятность безотказной работы и отказа. Полученный результат подтвердил возможность увеличения срока эксплуатации рельсов в метрополитене. При сравнении среднего ресурса рельсов на текущий год эксплуатации и на прогнозный (через 10 лет с момента проведения исследования) определено, что данная величина существенно увеличилась.

Предложен подход, основанный на совместном использовании нормативных документов ОАО «РЖД» и теории надежности с необходимыми корректировками, учитывающими условия эксплуатации рельсов в метрополитене.

Ключевые слова: одиночный выход рельсов, надежность рельсов, метрополитен, эксплуатация рельсов в метрополитене, железнодорожный путь, рельсы

Для цитирования: Ланис А. Л., Усов Д. А., Тархов В. А. К вопросу обоснования увеличения срока эксплуатации рельсов в метрополитене // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 3 (75). С. 78–87. DOI 10.52170/1815-9265_2025_75_78.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

To the question of justifying the increase in the service life of rails in the metro

Alexey L. Lanis¹, Dmitry A. Usov², Victor A. Tarkhov^{3✉}

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

¹alangeo@bk.ru

²usovda96@yandex.ru

³tarhovvictory@yandex.ru✉

Abstract. The article considers the condition of rails that have missed the standard tonnage in the metro. The actual condition of rails has been assessed by means of in-situ inspection and diagnostics using non-destructive testing methods. The most widespread defects were defects of the first group – metal pitting and delaminations, the parameters of which turned out to be acceptable for further operation.

Based on the results of the analysis of materials provided by metro and the application of the methodology of repair assignment by ‘Russian Railways’, dependencies were obtained that describe the occurrence of defects and failures from missed tonnage. Defectivity was excluded from the evaluation factors due to insignificant influence on

the assignment of continuous rail change. In turn, single rail failures influenced the determination of the rail end of life, which will occur no earlier than 10 years from the date of the study.

To verify the reliability of the obtained results, the reliability of rails in the metro railway was evaluated. In the calculation of operating time, the operating condition was corrected, thus the application of the methodology based on the reliability theory became possible in relation to the metro conditions.

By means of the calculation it was possible to determine the probability of failure-free operation and the probability of failure. The obtained result confirmed the possibility of increasing the service life of rails in metro. When comparing the average life of rails for the current year of operation and for the forecast one (in 10 years from the date of the study), this value increased significantly.

The approach based on the joint use of 'Russian Railways' normative documents and reliability theory with necessary adjustments taking into account the conditions of rail operation in the metro is proposed.

Keywords: single rail yield, rail reliability, metro, rail operation in metro, railway track, rails

For citation: Lanis A. L., Usov D. A., Tarkhov V. A. To the question of justifying the increase in the service life of rails in the metro. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(75):78–87. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_75_78.

Введение

Железнодорожный путь является сложным комплексом элементов, образующих единую конструкцию, которая должна обеспечивать безопасное движение подвижного состава непрерывно на протяжении всего жизненного цикла его составляющих. Отдельные элементы верхнего строения железнодорожного пути в процессе эксплуатации всего комплекса инженерных сооружений подвержены большим нагрузкам, чем элементы нижнего строения пути. В связи с этим современные нормы содержания рельсового пути [1] регламентируют непрерывное обеспечение безопасности движения. Для сохранения требуемых параметров каждого элемента необходимо производить частичное или полное их обновление. Примером таких процессов являются ремонты железнодорожного пути.

Ремонты требуют значительных капитальных затрат, которые возвращаются (окупаются) на протяжении длительного срока эксплуатации железнодорожного пути. Для того чтобы снизить капитальные затраты на проведение ремонтов, необходима такая конструкция пути, которая способна на большем интервале времени сохранять требуемые эксплуатационные свойства.

В метрополитене, как и на сетях железных дорог ОАО «РЖД», существуют конструкции, снижающие вибрационные воздействия на сооружения, расположенные вблизи инфраструктуры метрополитена [2]. Конструкция верхнего строения железнодорожного пути сети ОАО «РЖД» и метрополитена имеет принципиальное отличие: в последнем используется путевой бетон в качестве подшпального основания. Главным их сходством являются рельсы, а именно значительная сто-

имость их сплошной замены при проведении ремонтов всех уровней [3].

Рельсы – элемент верхнего строения пути, который первым воспринимает нагрузки от подвижного состава и перевозимых им грузов. Этот факт обуславливает высокие требования, предъявляемые к ним [4]. В свою очередь, выполнение этих требований отражается на стоимости этого элемента пути. Так, возможность увеличения межремонтного срока железнодорожного пути является актуальной проблемой не только для дорог сети ОАО «РЖД», но и для метрополитенов [5–7].

На сегодняшний день метрополитен является популярным видом городского транспорта. Это указывает на востребованность данного вида транспорта и высокое влияние на город в целом. Для обеспечения развития городской среды необходима безопасность различных процессов, в том числе и работы общественного транспорта. Особое внимание следует уделять инфраструктуре, так как ее состояние напрямую влияет на надежность и комфорт пассажиров. В то же время на путях метрополитена присутствуют рельсы первой укладки (уложенные при строительстве метрополитена), которые уже пропустили нормативный тоннаж. Для продления срока эксплуатации рельсов следует решить вопрос об их надежности. При этом обоснование увеличения межремонтного срока является важным аспектом жизненного цикла железнодорожного пути.

Материалы и методы исследования

Для проведения исследования были проанализированы: ведомости отступлений путеизмерительной тележки, рельсовая книга, журнал учета дефектных и остродефектных рельсов. Данные материалы позволили оценить фактическое состояние путей и возможность дальнейшей эксплуатации рельсов.

На сегодняшний день существуют методики определения срока проведения ремонта железнодорожного пути третьего уровня в условиях метрополитена:

1) нормативный документ для метрополитенов, учитывающий только пропущенный тоннаж [8];

2) распоряжение ОАО «РЖД», регламентирующее четкие критерии назначения [3];

3) теория надежности как обоснование срока эксплуатации рельсов [9].

Первый вариант методики определения срока назначения ремонта, устаревший нормативный документ [8], стал отправной точкой для проведения исследования.

Для назначения срока сплошной смены рельсов с применением второго варианта требуется выполнение натурного обследования состояния пути с применением средств неразрушающего контроля. В свою очередь, третий вариант основывается на результатах осмотра и анализе данных метрополитена. Очевидно, что совместное применение второго и третьего вариантов позволит точнее спрогнозировать возможность увеличения срока эксплуатации рельсов.

Для оценки фактического состояния рельсов были применены следующие средства неразрушающего контроля и вспомогательное оборудование:

- вихревой дефектоскоп «Вектор-60» и преобразователь ПВР-1;
- дефектоскоп ультразвуковой РДМ-22;
- измеритель твердости УЗИТ-3;
- штангенциркуль ШЦД-I-300 0,01.

Выполнен анализ состояния рельсов, лежащих в пути, на двухпутном участке метрополитена протяженностью 9 км, которые уже пропустили нормативный тоннаж в соответствии с [8]. Конструкция пути представляет собой рельсы Р65, скрепление типа КД, деревянные шпалы, омоноличенные путевым бетоном. По классификации железнодорожных путей ОАО «РЖД» метрополитен относится к 3-му классу [3].

Для увеличения межремонтного срока в метрополитене осуществляется переукладка рельсов в кривых практически каждые 100 млн т пропущенного тоннажа. В проведенном анализе такие выходы рельсов не учитывались ввиду их массовости в результате бокового износа головки.

Результаты исследования

Анализ материалов указал на необходимость совместного проведения натурного осмотра состояния пути и неразрушающего контроля всего сечения рельсов на участках диагностики первой линии. В итоге сплошной ультразвуковой дефектоскопии механизированной системой рельсов, относящихся к категории остродефектных, не обнаружено. Измерение твердости поверхности катания не показало значений, не укладывающихся в допускаемые границы [4]. Результаты вихревого контроля трещин на поверхности катания рельсов на участке протяженностью 200 м изображены на рис. 1.

В зонах проведения вихревого контроля поверхностный слой головки рельсов обеих нитей поврежден контактно-усталостными трещинами практически в равной степени: максимальные глубины трещин и их количество находятся на сопоставимом уровне по всем исследуемым участкам. Доли трещин с глубиной в середине диапазона располагаются на близком уровне: 44 и 39 %.

Итоги визуального осмотра и диагностики рельсов:

- отсутствуют остродефектные рельсы, лежащие в пути;
- твердость рельсов на поверхности катания отвечает требованиям по минимальному уровню твердости [4];
- измеренные геометрические размеры выкрашиваний не превышают допустимых значений.

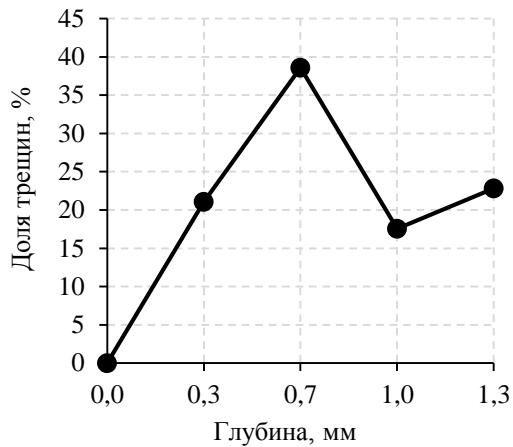
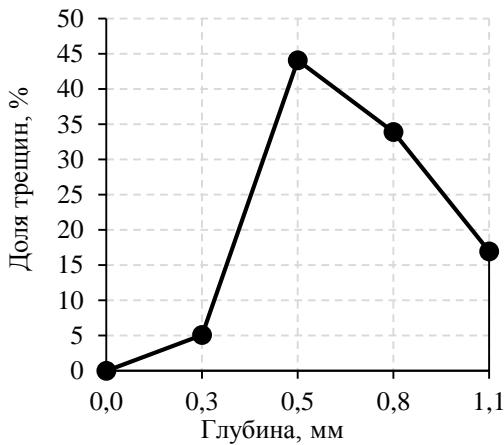
Выявлены самые распространенные дефекты:

- 11.1-2 – трещины и выкрашивание металла на боковой рабочей выкружке;
- 17.1 – отслоение и выкрашивание металла на поверхности катания;
- 99.1-3 – лишние болтовые отверстия в зоне стыков, в том числе выполненные газопламенным способом.

Дефекты девятой группы в статистическом анализе не учитывались, так как их появление и развитие не зависят от наработки тоннажа. Данные дефекты рельсов были допущены строителями в момент укладки железнодорожного пути в метрополитене.

Существующие сегодня критерии назначения сплошной смены рельсов отражены в таблице.

а)



б)

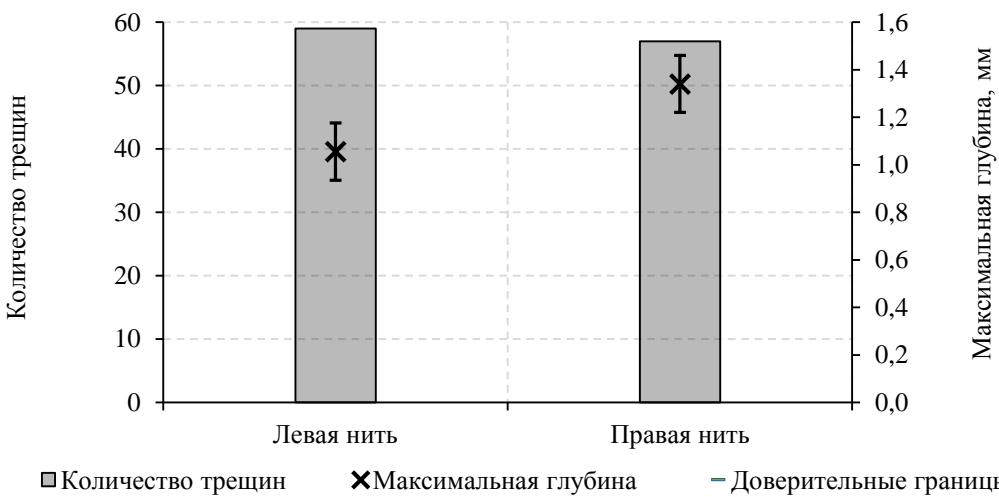


Рис. 1. Результаты вихретокового контроля рабочей грани поверхности катания рельсов на одном из участков диагностики:

а – распределение трещин по глубине; б – количество трещин и их максимальная глубина

Сравнение регламента нормативных документов

Нормативный документ	Основные критерии		Дополнительный критерий
	Периодичность выполнения капитального ремонта пути (числитель – млн т брутто, знаменатель – годы)	Одиночный выход рельсов, шт./км	
ОАО «РЖД» [3]	600/18	≥ 6	≥ 6
Метрополитен [8]	450/–	–	–

В таблице собрана информация для 3-го класса пути пассажирской специализации при назначении капитального ремонта первого уровня. В ремонтной схеме для данной классификации пути отсутствует ремонт третьего уровня. В условиях метрополитена капитальный ремонт третьего уровня (РС) является аналогом капитального ремонта первого уровня (КРН). При последнем проводится обновление

рельсошпальной решетки и подшпального основания, в метрополитене же обновление подшпального основания не требуется с такой периодичностью, которая необходима для щебеночного балласта на сети ОАО «РЖД», в связи с применением путевого бетона. В смене подрельсового основания в виде деревянных шпал и полушипбал также нет такой необходимости из-за разницы в эксплуатационных и при-

родно-климатических условиях пути подземного расположения и наземного. Таким образом, определение необходимости ремонта пути в метрополитене осуществляется по состоянию рельсового хозяйства.

Зависимость образования дефектов первой группы с нарастающим итогом на прямых участках от пропущенного тоннажа представлена на рис. 2, из которого видно, что дефектность рельсов описывается степенной функцией. Таким образом производится прогноз образования дефектов первой группы. На момент, когда рельсы первой укладки пропустят около 580 млн т, дефектность может составить 1,95 шт./км, в то время как на момент проведения исследования эта величина равна 1,00 шт./км.

В соответствии с [3] дефектность рельсов, как дополнительный критерий назначения ремонта 3-го уровня для метрополитена, равна 6 шт./км. Суммарное количество дефектных рельсов, отнесенное к длине главных путей, на первой линии меньше нормативного, а значит, данный критерий не выполняется, и тем самым дефектность рельсов первой группы в условиях метрополитена имеет незначительное влияние на назначение ремонтных работ. Таким образом, рельсы соответствуют требованиям [10, 11] и пригодны к эксплуатации.

Основной критерий назначения ремонта 3-го уровня – это одиничный выход рельсов, для метрополитена он равен 6 шт./км, при этом выходы рельсов от эксплуатационных дефектов не

учитываются. Убедившись, что дополнительный критерий назначения ремонта не выполняется, переходим к анализу основного. На рис. 3 изображен график зависимости количества одиночных выходов рельсов с нарастающим итогом от пропущенного тоннажа.

По результатам анализа материалов дистанции пути метрополитена были получены следующие результаты:

- интенсивность выходов рельсов составит 6 шт./км при пропущенном тоннаже 575 млн т;

- сплошная смена рельсов потребуется через 118 млн т пропущенного тоннажа, т. е. примерно к 2034 г. при неизменных эксплуатационных показателях (средняя грузонапряженность на участке метрополитена с момента ввода в его эксплуатацию составляет 11,71 млн т·км брутто/км в год).

Близкий результат был получен при анализе выходов рельсов в Московском метрополитене [12], что подтверждает достоверность прогнозирования отказов.

Анализ журнала дефектных и остродефектных рельсов дистанции пути метрополитена по полученным зависимостям дефектности и одиночных выходов показал: нельзя утверждать, что увеличение срока эксплуатации рельсов в метрополитене невозможно. Наоборот, если критерии назначения сплошной смены рельсов не удовлетворяют назначению ремонта, обязательно делается вывод об

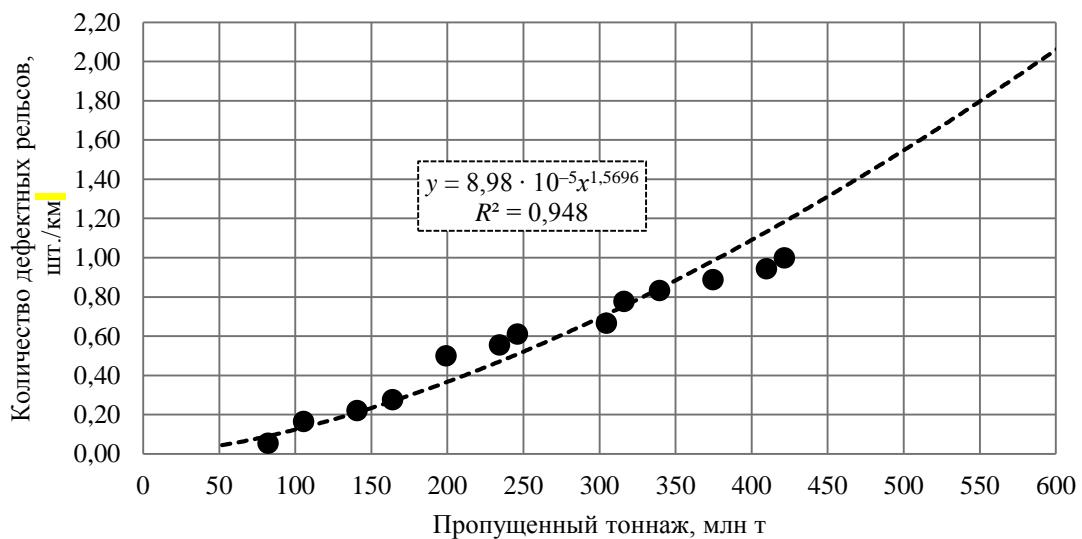


Рис. 2. Зависимость количества дефектных рельсов первой группы, лежащих в пути, от наработки тоннажа

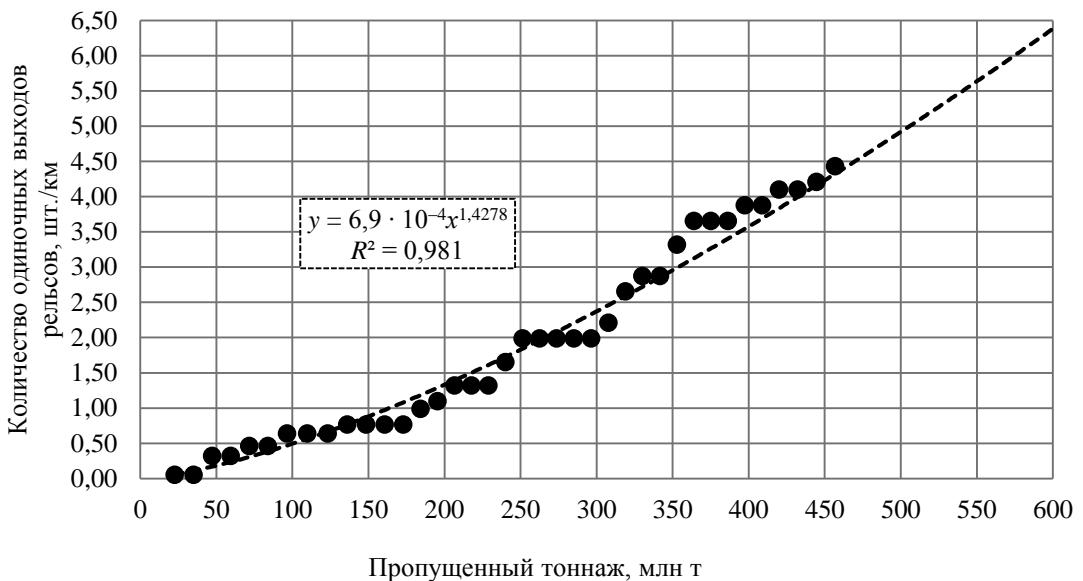


Рис. 3. Прогнозирование одиночных выходов рельсов

увеличении межремонтного срока. Таким образом, получены следующие результаты:

- основные критерии назначения сплошной смены рельсов на момент проведения исследования не выполняются [3]. При прогнозировании одиночных выходов рельсов в количестве 6 шт./км пропущенный тоннаж составит 575 млн т;
- дополнительный критерий по дефектности не выполняется;
- прогноз на ближайшие 10 лет о продлении срока эксплуатации рельсов положителен.

Данные выводы получены в результате наложения современных норм сети железных дорог ОАО «РЖД» на условия метрополитена. Но это не позволяет с достаточной точностью использовать полученную информацию, так как условия эксплуатации железных дорог ОАО «РЖД» отличаются от условий метрополитена. Основными отличиями являются конструкция пути, нагрузки на ось, скоростной режим, температурные воздействия, а также техническое обслуживание, которое в метрополитене осуществляется только в период ночного технологического «окна».

На сети ОАО «РЖД» существуют условия, когда необходимо устраниить какую-либо неисправность, чтобы обеспечить безопасность движения подвижного состава [1]. Обнаружение любых неисправностей является неотъемлемой частью текущего содержания пути. В метрополитене выявление неисправностей, а также выполнение планово-предупредитель-

ных и ремонтных работ возможно только в ограниченный промежуток времени и происходит совместно. Данное замечание является ключевым фактором, который необходимо учитывать не только при анализе необходимости проведения ремонтов, но и при обосновании продления срока эксплуатации элементов пути с применением теории надежности. Подобные методы были детально рассмотрены, и доказаны способы повышения эксплуатационной надежности пути [13].

Для того чтобы подтвердить или опровергнуть полученные результаты, необходимо определить показатели надежности, оценка которых подробно рассмотрена для сети железных дорог ОАО «РЖД» в статье [14]. Проанализировав данное исследование, приходим к выводу, что в данном случае нас интересует долговечность в связи с поставленной целью обоснования увеличения срока эксплуатации рельсов в метрополитене. Определение показателей надежности с учетом условий эксплуатации рельсов в условиях метрополитена уже рассматривалось зарубежными учеными [6, 7].

Показателем долговечности является средний ресурс (наработка тоннажа T до отказа) рельсов $T_{ср}$, млн т / год. В данном случае именно этот показатель способен оценить надежность рельсов в метрополитене.

Оценка надежности будет производиться путем применения распределения Вейбулла, которое используется для моделирования отказов объектов, подверженных износу. С помощью

данного распределения были определены следующие параметры надежности рельсов:

- вероятность безотказной работы $P(T)$;
- вероятность отказа $F(T)$;
- средняя наработка до отказа (ресурс) по времени $T_{\text{ср}}^t(t_i)$.

Вероятность безотказной работы $P(T)$ позволяет оценить, что за определенный промежуток наработки не произойдет ни одного отказа. Вероятность отказа $F(t)$ является обратной величиной, которая определяет вероятность того, что при той же наработке произойдет отказ.

Формулы, описывающие приведенные зависимости, имеют вид:

$$P(T) = e^{-\left(\frac{T}{\lambda}\right)^b}, \quad (1)$$

$$F(T) = 1 - P(T) = 1 - e^{-\left(\frac{T}{\lambda}\right)^b}, \quad (2)$$

где T – пропущенный в определенный момент тоннаж, млн т; λ , b – масштабный и влияющий на форму кривой параметры распределения Вейбулла соответственно, полученные из расчета по методу максимального правдоподобия.

Графики двух этих функций изображены на рис. 4.

Из представленного графика видно, что данные функции меняются с увеличением наработки тоннажа и являются противоположными друг другу, т. е. с увеличением пропущенного тоннажа снижается вероятность того, что отказ рельсов не случится, а вероятность того, что отказ произойдет, возрастает.

Распределение вероятностей показало, что при наработке в 575 млн т наступает момент, когда доля отказов составит 92,5 % от общего числа рельсов первой укладки, в то время как вероятность безотказной работы – всего 7,5 %. На момент проведения исследования (пропущенный тоннаж 457 млн т) величины показателей надежности составили 83,8 и 16,2 % соответственно. Исходя из того, что при наработке в 575 млн т интенсивность одиночных выходов составит 6 шт./км, делается вывод: полученное процентное соотношение определяет граничные условия эксплуатации рельсов.

Таким образом, исходя из прогноза вероятностей отказов можно сделать вывод о продлении срока эксплуатации рельсов в метрополитене не более чем на 10 лет, или 118 млн т пропущенного тоннажа.

Возвращаясь к среднему ресурсу, хочется отметить, что определить данную величину не представляется возможным по формулам, представленным в методике расчета показателей надежности для железных дорог ОАО «РЖД» [9], в связи с отличиями, описанными в статье ранее.

Для учета особенностей условий работы железнодорожного пути в метрополитене необходимо ввести корректировку в формулу для расчета среднего ресурса рельсов по времени их эксплуатации.

Как было определено ранее, время технического обслуживания железнодорожного

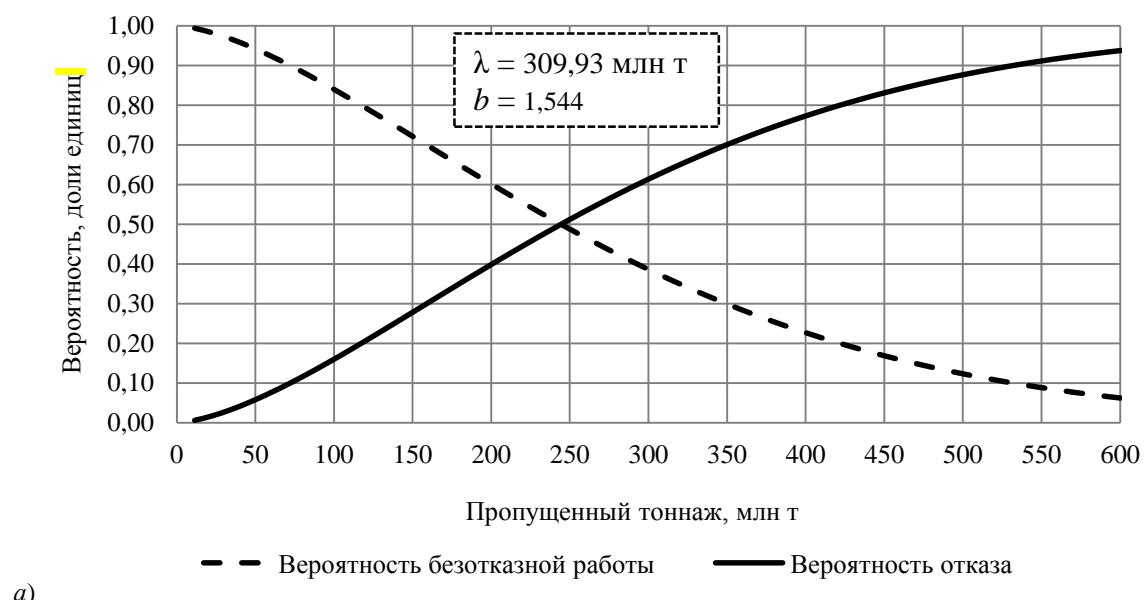


Рис. 4. Зависимости вероятностных функций безотказной работы и отказов рельсов от пропущенного тоннажа

пути в метрополитене ограничено, поэтому учет времени наработка нуждается в уменьшении, так как любые работы в данных условиях производятся в условиях ночных технологического «окна».

Таким образом, необходимо вычислить суммарное время обслуживания пути, т. е. когда обращение поездов прекращается, и далее вычесть его из интервала наблюдения. Тогда формула для определения величины наработки времени будет иметь вид

$$t_i = T_h - T_o^\Sigma, \quad (3)$$

где T_h – интервал наблюдения, год; T_o^Σ – суммарное время, затраченное на техническое обслуживание пути за интервал наблюдения, год.

Значение T_o^Σ определяется по формуле

$$T_o^\Sigma = \sum_{i=1}^{T_h} t_o, \quad (4)$$

где t_o – продолжительность технического обслуживания, год.

Для метрополитена интервал, отводимый на обслуживание путей, постоянен и составляет 5,083 ч (5 ч 5 мин) в рабочие дни, тогда за год $t_o = 0,143$ года.

Теперь, когда можно точно определить наработку рельсов, необходимо вычислить показатель долговечности – средний ресурс, который рассчитывается с помощью распределения Вейбулла:

$$T_{cp}^t(t_i) = \lambda_i \Gamma\left(1 + \frac{1}{b_i}\right), \quad (5)$$

где $\Gamma\left(1 + \frac{1}{b_i}\right)$ – гамма-функция распределения Вейбулла, связывающая параметры распределения для подсчета искомой величины.

Средний ресурс рассчитывается по годам эксплуатации в связи с тем, что линии метрополитена осуществляют пассажирские перевозки, так же как и линии ОАО «РЖД» пассажирской специализации. Для последних регламентируются годы эксплуатации, которые определяют срок службы элементов пути. Так, для метрополитена логичным будет оценивание среднего ресурса именно по годам.

На сегодняшний день средний ресурс рельсов $T_{cp}^t(t_i)$ в метрополитене составляет 14,4 года, в то время как по прогнозному значению, когда интенсивность одиночных выходов рельсов составит 6 шт./км, величина среднего ресурса $T_{cp}^t(t_i)$ равна 21,4 года. В результате увеличения срока эксплуатации рельсов на 10 лет их сред-

ний ресурс $T_{cp}^t(t_i)$ увеличится на 32 %, что является существенным преимуществом.

Результаты определения возможности увеличения срока эксплуатации рельсов в метрополитене совместным применением вариантов оценки критериев назначения ремонта и расчетом показателей надежности подтверждаются.

Метод оценки критериев назначения ремонта железнодорожного пути показал:

– увеличение срока эксплуатации рельсов возможно на 10 лет, или 118 млн т пропущенного тоннажа;

– период эксплуатации рельсов составит 49 лет, или 575 млн т пропущенного тоннажа.

Уточнение метода, основанного на теории надежности, позволило подтвердить полученные результаты, а также рассчитать величину среднего ресурса рельсов. Таким образом:

– увеличение срока эксплуатации рельсов на 10 лет является возможным в связи с тем, что вероятность их безотказной работы на текущий момент составляет 83,8 %, а вероятность отказа – 16,2 %;

– критические вероятности безотказной работы и вероятности отказа равны 7,5 и 92,5 % соответственно;

– текущий средний ресурс рельсов составляет 14,4 года, прогнозируемый средний ресурс равен 21,4 года;

– увеличение среднего ресурса рельсов при увеличении срока их эксплуатации в метрополитене составит 32 %.

Выводы

В результате проведения исследования была произведена оценка возможности увеличения срока эксплуатации рельсов в метрополитене. При оценке назначения сплошной смены по нормативному документу для метрополитенов ремонт необходим в данный момент, однако две другие представленные методики говорят об обратном.

По результатам применения различных вариантов назначения ремонта получено следующее:

1. Способами неразрушающего контроля и визуального осмотра было установлено, что эксплуатация рельсов на данный момент не может привести к снижению безопасности движения поездов, так как дефекты рельсов (внутренние и видимые) не превышают допускаемых величин, регламентирующих замену элементов пути.

2. При анализе одиночных выходов рельсов установлено, что данная величина зависит от пропущенного тоннажа и аппроксимируется степенной зависимостью, описывающей отказы рельсов с достаточной достоверностью, благодаря которой производится прогноз увеличения срока эксплуатации рельсов в метрополитене. При этом срок наступления сплошной смены рельсов откладывается не более чем на 10 лет.

3. Анализ показателей надежности привел к необходимости оценки показателя долговечности рельсов (средний срок службы). Скорректированная формула расчета данного показателя позволила подтвердить возможности увеличения срока эксплуатации рельсов в метрополитене.

Благодаря применению метода расчета показателей надежности получилось достоверно спрогнозировать наступление момента, когда дальнейшая эксплуатация рельсов становится

небезопасной не только для пассажиров, но и для инфраструктуры метрополитена в целом.

Итогом работы является доказательное обоснование увеличения срока эксплуатации рельсов в метрополитене при совместном использовании двух вариантов – применяемого на сети ОАО «РЖД» и основанного на оценке показателей надежности, с корректировкой формул последнего, позволяющей учесть время, которое отводится для технического обслуживания железнодорожного пути в тоннеле метрополитена. Рекомендуется использование именно такого подхода в связи с тем, что он с достаточной точностью способен определить и спрогнозировать отказы железнодорожного пути.

В качестве дальнейшего развития темы планируется применить используемые в статье методы для анализа увеличения срока эксплуатации железнодорожного пути на деревянных шпалах, омоноличенных путевым бетоном, в метрополитене.

Список источников

1. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» № 2288/р от 14.11.2016 // КонсультантПлюс : [сайт]. URL: <https://company.rzd.ru/api/media/resources/1503751?action=download> (дата обращения: 25.02.2025).
2. Гречаник А. В., Замуховский А. В., Наумов Б. В. Виброгасящие скрепления для метрополитена // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2011. № 4 (12). С. 62–69.
3. Правила назначения ремонтов железнодорожного пути : утверждены распоряжением ОАО «РЖД» № 2888/р от 17.12.2021 // КонсультантПлюс : [сайт]. URL: <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=804210> (дата обращения: 26.02.2025).
4. ГОСТ Р 51685–2013. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия. Москва : Стандартинформ, 2014. 27 с.
5. Замуховский А. В., Семенов Е. В. Анализ удельного выхода рельсов в Московском метрополитене // Путь и путевое хозяйство. 2020. № 5. С. 10–12.
6. Матвецов В. И., Кебиков А. А., Сырокваш А. А. Анализ повреждений нетермоупрочненных рельсов при эксплуатации в условиях минского метрополитена // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. 2005. № 2 (11). С. 64–70.
7. Шехватов А. А., Витольберг В. Г., Потапов Д. А. Исследование работы рельсов в кривых участках пути в условиях метрополитена // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. 2003. № 2. С. 182–186.
8. Положение о проведении планово-предупредительного ремонта верхнего строения пути, земляного полотна и контактного рельсов метрополитенов Союза ССР. Москва : Транспорт, 1982. 28 с.
9. Методика расчета показателей надежности и безопасности функционирования верхнего строения пути : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» № 1508/р от 15.06.2020. Москва, 2020. 81 с.
10. Инструкция «Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и остродефектных рельсов» : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» № 2499/р от 23.10.2014 : (редакция от 07.10.2022) // Гарант : информационно-правовое обеспечение. URL: <https://base.garant.ru/70867010/> (дата обращения: 24.02.2025).
11. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации : утверждены Приказом Минтранса России № 250 от 23.06.2022 // КонсультантПлюс : [сайт]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_422554/ (дата обращения: 28.01.2025).
12. Замуховский А. В., Погосян Д. А. Оценка конструкций верхнего строения пути метрополитена по критериям надежности // Путь и путевое хозяйство. 2020. № 12. С. 15–17.
13. Погосян Д. А. Повышение эксплуатационной надежности подрельсового основания пути метрополитена на основе анализа геометрии рельсовой колеи : специальность 2.9.2 «Железнодорожный путь, изыскание

и проектирование железных дорог» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук /
Давид Арменович Погосян ; Российский университет транспорта. Москва, 2022. 208 с.

14. Величко Д. В., Севостьянов А. А., Антерейкин Е. С. Оценка надежности рельсов на участках Транс-сибирской магистрали // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2019. № 1. С. 5–11.

References

1. Instruction on the current maintenance of railway track. Approved by the order of ‘Russian Railways’ No. 2288/r of 14.11.2016. *ConsultantPlus*: [site]. (In Russ.). URL: <https://company.rzd.ru/api/media/resources/1503751?action=download>.
2. Grechanik A. V., Zamukhovsky A. V., Naumov B. V. Vibration-absorbing fastenings for the underground. *Bulletin of the Ural State University of Railway Transport*. 2011;(12):62–69. (In Russ.).
3. Rules for assigning repairs of railway track. Approved by the order of ‘Russian Railways’ No. 2888/r from 17.12.2021. *ConsultantPlus*: [site]. (In Russ.). URL: <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=804210>.
4. GOST R 51685–2013. Railway rails. General technical conditions. Moscow: Standardinform; 2014. 27 p. (In Russ.).
5. Zamukhovsky A. V., Semyonov E. V. Analysis of specific rail yield in the Moscow Metro. *Track and Track Facilities*. 2020;(5):10–12. (In Russ.).
6. Matvetsov V. I., Kebikov A. A., Syrovash A. A. Damage analysis of non-heat-strengthened rails during operation in conditions of Minsk underground. *Bulletin of the Belarusian State University of Transport: Science and Transport*. 2005;(11):64–70. (In Russ.).
7. Shekhvatov A. A., Vitolberg V. G., Potapov D. A. Investigation of rails operation in curved track sections under the conditions of underground railway. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*. 2003;(2):182–186. (In Russ.).
8. Regulations on the planned preventive maintenance of track structure, earth bed and contact rails of subways of the Union of Soviet Socialist Republics. Moscow: Transport; 1982. 28 p. (In Russ.).
9. Methodology for calculating reliability and safety indicators of track structure operation. Approved by the order of ‘Russian Railways’ No. 1508/r dated 15.06.2020. Moscow; 2020. 81 p. (In Russ.).
10. Instruction. Defects of rails. Classification, catalogue and parameters of defective and acutely defective rails. Approved by the order of ‘Russian Railways’ No. 2499/r dated 23.10.2014: (edition of 07.10.2022). *Garant*: [site]. (In Russ.). URL: <https://base.garant.ru/70867010/>.
11. Rules of technical operation of railways of the Russian Federation. Approved by the Order of the Ministry of Transport of Russia № 250 from 23.06.2022. *ConsultantPlus*: [site]. (In Russ.). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_422554/.
12. Zamukhovsky A. V., Pogosyan D. A. Evaluation of the underground track structure structures by reliability criteria. *Track and Track Facilities*. 2020;(12):15–17. (In Russ.).
13. Pogosyan D. A. Increase of the operational reliability of the sub-rail base of the metro track on the basis of the analysis of the rail track geometry: 2.9.2 Railway track, survey and design of railways. Dissertation for the degree of Candidate of Engineering. David Armenovich Pogosyan; Russian University of Transport. Moscow; 2022. 208 p. (In Russ.).
14. Velichko D. V., Sevostyanov A. A., Antereykin E. S. Assessment of rail reliability on the sections of the Trans-Siberian railway. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2019;(48):5–11. (In Russ.).

Информация об авторах

А. Л. Ланис – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Путь и путевое хозяйство» Сибирского государственного университета путей сообщения.

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

В. А. Тархов – аспирант-стажер, студент пятого курса факультета «Транспортное строительство» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

A. L. Lanis – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Track and Track Facilities Department, Siberian Transport University.

D. A. Usov – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Track and Track Facilities Department, Siberian Transport University.

V. A. Tarkhov – Postgraduate Trainee, fifth-year student of the Transport Construction Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 27.03.2025; одобрена после рецензирования 05.05.2025; принятая к публикации 20.06.2025.

The article was submitted 27.03.2025; approved after reviewing 05.05.2025; accepted for publication 20.06.2025.

Научная статья
УДК 625.143.482
doi:10.52170/1815-9265_2025_75_88

К вопросу усиления конструкции бесстыкового пути при наличии фактора торможения поездов

Илья Константинович Ардышев^{1✉}, Дмитрий Валерьевич Величко²

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

¹ardyshev.ilya@ya.ru[✉]

²vdv.nsk@mail.ru

Аннотация. В статье дан обзор существующих теоретико-экспериментальных исследований и подходов к расчетам и усилению конструкции железнодорожного пути. Современные тенденции в проектировании и строительстве железнодорожного пути характеризуются стремлением обеспечить прочность и надежность конструкции.

Обосновано назначение нового параметра повышения температуры рельсовой плети бесстыкового пути при наличии фактора торможения поездов, ведомых современными и перспективными локомотивами. Обозначено, что недостаточно внимания в настоящее время уделено температурной работе бесстыкового пути, как основной конструкции пути на сети железных дорог России, особенно в сложных эксплуатационных условиях с учетом сверхнормативных продольных сил, возникающих при интенсивном электродинамическом торможении полногрузовых и длинносоставных поездов, ведомых современными тяжелыми многосекционными локомотивами.

Усовершенствована методика проектирования усиления пути при наличии фактора торможения. Систематизированы существующие варианты усиления пути, предложен экстенсивно-интенсивный подход к их выбору. При проектировании и последующей реализации варианта усиления бесстыкового пути рекомендуется использовать алгоритмы, интегрирующие экспертные мнения, данные теоретических исследований и натурных испытаний, с целью назначения наилучшего варианта, учитывая при расчетах пути по критическим параметрам фактор торможения поездов, как один из наиболее неблагоприятных видов внешнего воздействия на железнодорожный путь. Предложен укрупненный алгоритм назначения варианта усиления конструкции бесстыкового пути с учетом фактора торможения поездов, включая модель приоритизации вариантов усиления пути.

Даны рекомендации по включению результатов настоящего исследования в нормативную документацию, регламентирующую проектирование, строительство и эксплуатацию бесстыкового пути.

Ключевые слова: устойчивость пути, выброс пути, торможение локомотива, усиление конструкции пути

Для цитирования: Ардышев И. К., Величко Д. В. К вопросу усиления конструкции бесстыкового пути при наличии фактора торможения поездов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 3 (75). С. 88–96. DOI 10.52170/1815-9265_2025_75_88.

Original article

To the question of strengthening the structure of a continuously welded rail track in the presence of a braking factor

Ilya K. Ardyshев^{1✉}, Dmitry V. Velichko²

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

¹ardyshev.ilya@ya.ru[✉]

²vdv.nsk@mail.ru

Abstract. The article provides an overview of existing theoretical and experimental studies and approaches to strengthening the structure of a railway track. Modern trends in the design and construction of a railway track are characterized by the desire to ensure the strength and reliability of the structure.

The purpose of a new parameter for increasing the temperature of a continuously welded rails in the presence of a braking factor for trains pulled by modern and prospective locomotives is substantiated. It is noted that insufficient attention is currently paid to the temperature operation of a continuously welded track as the main track structure on the Russian railway network, especially under difficult operating conditions, taking into account the excessive longitudinal forces that arise during intensive electrodynamic braking of full-load and long-unit trains pulled by modern heavy multi-section locomotives.

The condition for the stability of a continuously welded track is formulated taking into account the braking factor of trains. The methodology for designing track reinforcement in the presence of a braking factor is improved. The existing track reinforcement options are systematized; an extensive-intensive approach to choosing reinforcement options is proposed. When designing and subsequently implementing a continuously welded track strengthening option, it is recommended to use algorithms that integrate expert opinions, theoretical research data and field tests in order to assign the best option, taking into account the train braking factor when calculating the track according to critical parameters, as one of the most unfavorable types of external impact on the track. An algorithm is proposed for assigning a continuously welded track strengthening option taking into account the train braking factor.

Recommendations are given for including the results of this study in regulatory documentation governing the design, construction and operation of continuously welded track.

Keywords: rail track stability, rail track buckling, locomotive braking, strengthening the structure of rail track

For citation: Ardyshev I. K., Velichko D. V. To the question of strengthening the structure of a continuously welded rail track in the presence of a braking factor. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(75):88–96. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_75_88.

Введение

К началу второй четверти XXI в. сектор железнодорожных грузоперевозок столкнулся с необходимостью адаптации к условиям глобальных экономических преобразований, требующих постоянного совершенствования инфраструктурных объектов, включая железнодорожный путь, с целью поддержания конкурентоспособности и устойчивого развития отрасли.

Правлением ОАО «Российские железные дороги» поставлена задача разработки новой конструкции железнодорожного пути и технологий содержания, обеспечивающих наработку 2,5 млрд т брутто пропущенного тоннажа. В условиях совершенствования конструкции железнодорожного пути, обеспечивающей наработку данного тоннажа, становится актуальным и активно реализуется проектирование инновационных конструкций, а также разработка номенклатуры российского подвижного состава для скоростей движения до 400 км/ч (пассажирских и грузовых модификаций), достижение повышенной до 300 кН нагрузки на ось подвижного состава, развитие тяжеловесного движения посредством создания линейки инновационных грузовых вагонов, увеличение длины и массы поездов.

Однако недостаточно вниманияделено температурной работе бесстыкового пути, как основной конструкции железнодорожного пути на сети дорог России, особенно в сложных эксплуатационных условиях с учетом сверхнормативных продольных сил, возникающих при интенсивном электродинамическом торможении полногрузных и длинносоставных поездов, ведомых современными тяжелыми многосекционными локомотивами.

Элементы железнодорожного пути проявляют горизонтальную упругость даже при надежной работе связей между ними, поэтому

данний аспект нельзя игнорировать. С учетом вышесказанного, необходимо обосновать назначение новых параметров для конструкции бесстыкового пути, которые будут учитывать наличие фактора торможения поездов, одного из наиболее неблагоприятных факторов внешнего воздействия на конструкцию.

Существующий подход к усилению конструкции пути

Проблема выбора оптимального варианта усиления конструкции железнодорожного пути остается актуальной в исследовательском поле. Среди ключевых факторов, определяющих выбор варианта усиления, выделяются тип подвижного состава, климатические условия, частота прохождения поездов, требуемый уровень надежности и многое другое. Внимание уделено особенностям материалов, используемых в качестве усиливающих элементов, и роли технико-экономической целесообразности выбранного метода.

Современные тенденции при проектировании и строительстве железнодорожного пути характеризуются стремлением обеспечить высокую прочность и надежность конструкции, минимизировав затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание. Ключевыми факторами, определяющими стратегию усиления, являются климатические условия, объем грузовых перевозок, технические характеристики элементов пути и современные достижения в области строительных материалов и технологий.

Новым для сети железных дорог России способом усиления является технология «холодного ресайклинга» (*cold deep in-place recycling*), применяемая для формирования подбалластного защитного слоя. Технология предусматривает переработку старого слоя основной площадки земляного полотна и добавку минеральных стабилизаторов с формированием прочного

и надежного основания для верхнего строения железнодорожного пути [1].

Исследователи активно разрабатывают новые конструкции железнодорожного пути, способные выдерживать динамические нагрузки и обеспечивать повышенный ресурс эксплуатации. Примером является разработка новой конструкции пути, рассчитанной на пропуск 2,5 млрд т брутто [2]. Такие конструкции включают элементы, повышающие стойкость к износу и внешним механическим воздействиям.

Один из подходов к укреплению насыпей заключается в армировании грунтовых оснований с последующим закреплением твердеющими растворами [3]. Профессор А. Л. Ланис утверждает, что этот метод обеспечивает равномерное распределение нагрузки и повышает стабильность конструкции в неблагоприятных эксплуатационных условиях при интенсивном грузовом движении.

Использование композитных материалов представляется перспективным направлением при проектировании усиления конструкции железнодорожного пути. А. В. Савин совместно с коллегами рассматривает возможность применения композитов в путевом комплексе [4]. Преимущества композитных материалов в их легкости, стойкости к коррозии и долговечности, что открывает перспективы для их массового внедрения.

Важным аспектом является усиление подшпального основания, особенно в суровых сибирских условиях. Профессор Г. К. Щепотин предлагает эффективные методы усиления подшпального основания [5]. Его работа посвящена вопросам предотвращения просадок и деформаций грунта, возникающих под действием тяжелой вагонной массы.

Внимание уделяется разработкам безрезьбовых рельсовых скреплений, которые упрощают монтаж и снижают трудозатраты на установку. Д. В. Величко совместно с коллегами [6] предлагает технологию безрезьбовых соединительных устройств, увеличивающую прочность рельсошпальной решетки и сокращающую количество отказов.

Одним из перспективных направлений является модификация конструкций анкерных рельсовых скреплений и подрельсовых подкладок. Так, патентные решения [7, 8] предлагают варианты, позволяющие увеличить площадь кон-

такта между элементами пути и усилить сцепление, что уменьшит вибрации и предотвратит преждевременный износ рельсов.

Современные подходы к выбору конструкции железнодорожного пути отражены в работе профессора В. И. Новаковича [9]. Проведен анализ традиционных представлений о необходимости увеличения массы элементов верхнего строения пути при высоких грузонапряженности, скорости и осевых нагрузках. Установлено, что оптимальное сочетание эксплуатационных качеств достигается применением рельсов и шпал с наименьшей возможной массой, обеспечивающей необходимую устойчивость пути и повышенную сопротивляемость сдвигу. Предложены конструктивные решения, подтвержденные испытаниями (облегченная железобетонная шпала и упругие клеммы специальной формы), гарантирующие надежную фиксацию рельсов.

Кроме того, вопросам совершенствования метода расчета устойчивости бесстыкового пути посвящены работы О. А. Суслова [10], Г. М. Стояновича [11], В. И. Новаковича [12] и других отечественных ученых.

Исследования в обозначенной сфере знаний должны фокусироваться на разработке стандартизованных процедур оценки состояния и прогнозирования ресурса пути, а также на создании универсальных решений, адаптируемых к различным условиям эксплуатации. Исследования должны быть направлены на создание алгоритмов, интегрирующих экспертные мнения, данные теоретических исследований и натурных испытаний, для выработки универсальных принципов назначения наилучшего варианта усиления конструкции железнодорожного пути.

Методы исследования

Бесстыковой путь на главных путях железнодорожных дорог России, в соответствии с Инструкцией по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути [13], может укладываться и эксплуатироваться без ограничений по климатическим условиям в прямых и в криволинейных участках пути радиусом не менее 250 м.

Для предотвращения случаев нарушения устойчивости бесстыкового пути рельсовые плети должны закрепляться на постоянный режим работы при оптимальной температуре $t_{\text{опт}} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

В работах [14, 15] с целью повышения достоверности оценки устойчивости бесстыкового пути в вариативных эксплуатационных условиях при торможении современных [14] и перспективных [15] локомотивов предложен параметр повышения температуры рельсовой пластины при наличии фактора торможения Δt_{τ} .

Параметр повышения температуры рельсовой пластины при электродинамическом торможении локомотива

$$\Delta t_{\tau} = \frac{k_0 p_{\tau-1}}{\alpha U_1(z) \cdot 10^3}, \quad (1)$$

где k_0 – коэффициент относительной жесткости подрельсового основания в продольном направлении, м^{-1} ; $p_{\tau-1}$ – интенсивность распределенной тормозной нагрузки от локомотива, kH/m ; α – коэффициент линейного расширения рельсовой стали, $1/\text{°C}$; $U_1(z)$ – модуль упругости рельсового основания в горизонтальном (продольном) направлении в пределах колесной базы локомотива, МПа [14].

Зависимость параметра повышения температуры рельсовой пластины Δt_{τ} от модуля продольной упругости рельсового основания при

экстренном торможении современных и перспективных видов локомотивов представлена в виде трехосной гистограммы (рис. 1).

Анализ полученных данных показывает, что при переходе на эксплуатацию перспективных локомотивов повышается влияние параметра Δt_{τ} на напряженно-деформированное состояние бесстыкового пути.

Известно, что в прямых участках пути и в криволинейных радиусом $R > 350$ м применяется типовая конструкция пути. При радиусе $250 \leq R \leq 350$ м, согласно Инструкции по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути [13], может применяться усиленная конструкция, реализуемая с помощью укладки железобетонных шпал с повышенным сопротивлением сдвигу совместно с омоноличиванием плеча и откоса балластной призмы – вариант усиления № 3 (рис. 2).

При коррекции допускаемого по условию устойчивости пути повышения температуры рельсовой пластины $[\Delta t_y]$ необходимость в усилении пути возникает раньше. В этом случае имеет место проблема повышения устойчивости бесстыкового пути за счет его усиления.

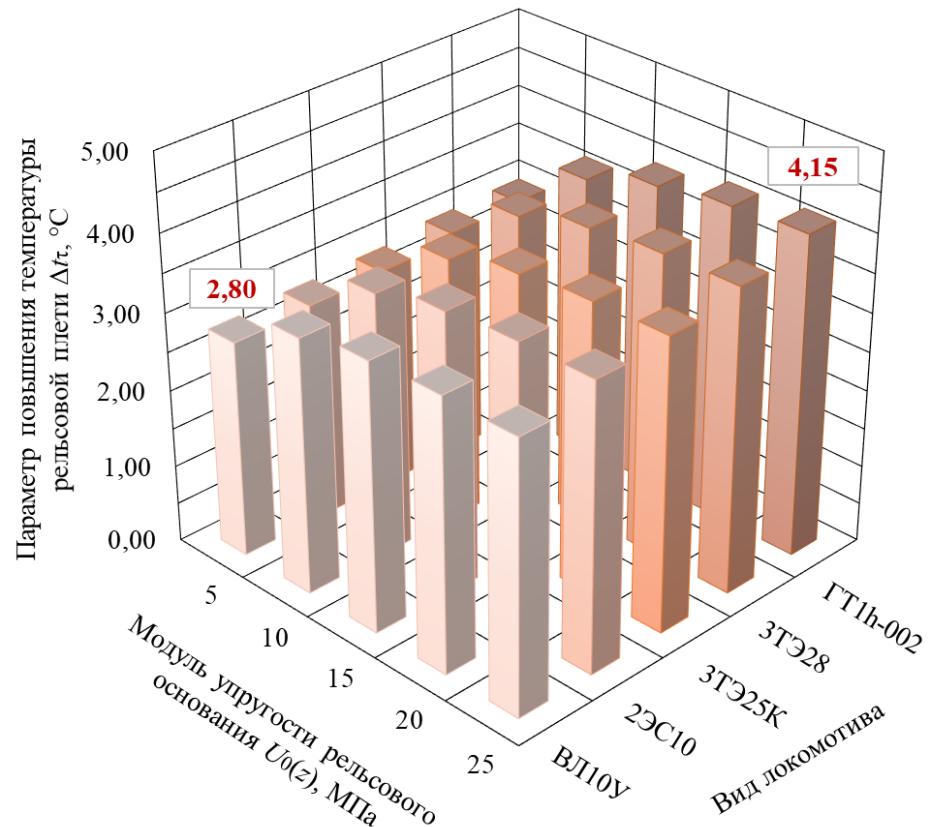


Рис. 1. Повышение температуры рельсовой пластины Δt_{τ} в зависимости от условий эксплуатации для современных и перспективных видов локомотивов

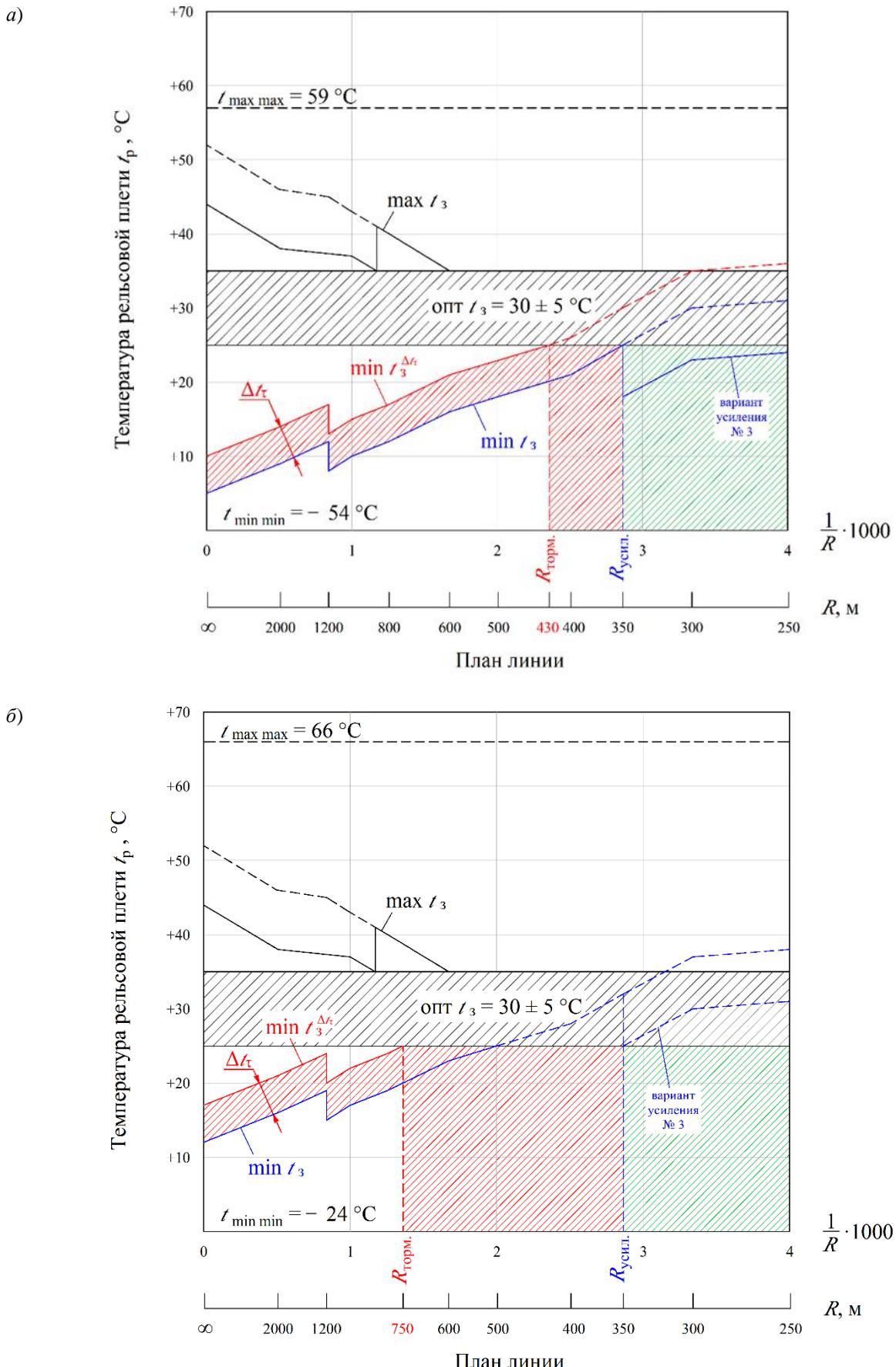


Рис. 2. Интервалы закрепления бесстыкового пути на постоянный режим работы с учетом торможения поездов:
а – для Западно-Сибирской железной дороги; *б* – для Северной железной дороги

Параметр Δt_t может быть найден для различных типов локомотивов и вагонов в составе поезда, в вариативных условиях эксплуатации, а также с учетом особенно неблагоприятных условий эксплуатации.

Результаты

Алгоритм назначения варианта усиления конструкции бесстыкового пути с учетом фактора торможения представлен на рис. 3.

Даны предложения по разработке численной модели бесстыкового пути с целью оценки влияния отдельных факторов на резерв его устойчивости [16].

В части определения устойчивости при воздействии сжимающей температурной силы в расчет введен параметр повышения температуры рельсовой пласти при наличии фактора торможения. Расчет интервалов температур закрепления рельсовых плеей на постоянный режим работы скорректирован с помощью введения параметра повышения температуры рельсовой пласти при наличии фактора торможения. Предложен экстенсивно-интенсивный подход при назначении варианта усиления пути.

Основное направление стратегии перехода от прочного пути на железных дорогах России

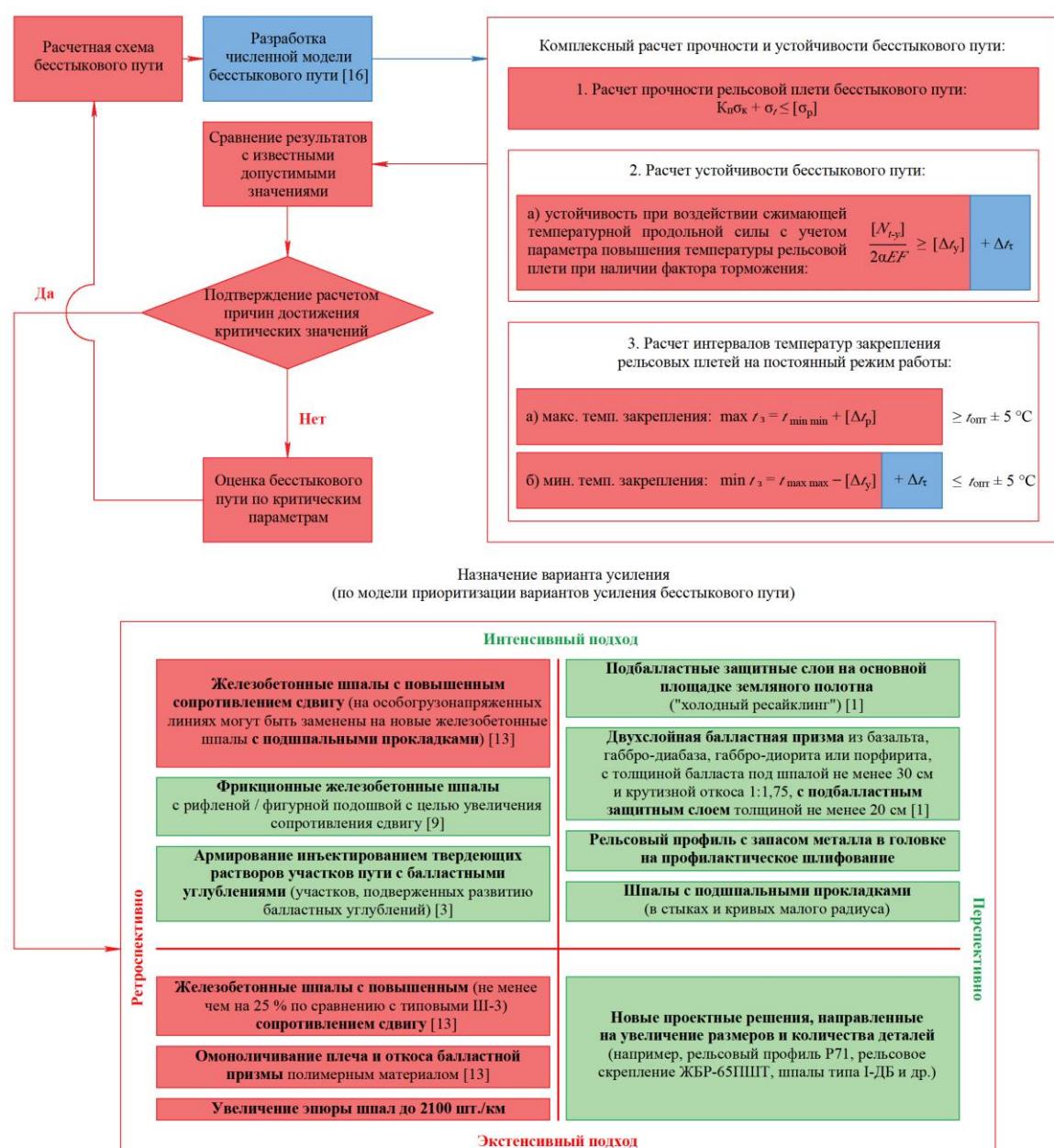


Рис. 3. Алгоритм назначения варианта усиления конструкции бесстыкового пути с учетом фактора торможения поездов:

красный цвет – существующие элементы алгоритма; синий – предложения автора;
зеленый – новые варианты усиления бесстыкового пути

к надежному – повышение безотказности и долговечности пути без увеличения его материоемкости [17] (интенсивный подход). Можно в несколько раз повысить надежность существующих конструкций железнодорожного пути интенсивными методами без увеличения их материоемкости. Для современных конструкций пути наиболее эффективен метод перераспределения местных напряжений в элементах пути и снижения указанных напряжений за счет совершенствования конструкции без изменения материоемкости пути [17].

При проектировании и последующей реализации варианта усиления конструкции пути рекомендуется использовать алгоритмы, интегрирующие экспертные мнения, данные теоретических исследований и натурных испытаний, с целью назначения наилучшего варианта усиления пути, в том числе учитываяющего при расчетах фактор торможения поездов, как наиболее неблагоприятный вид внешнего воздействия на железнодорожный путь.

Рекомендации в Инструкцию по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути

С целью недопущения потери устойчивости рельсошпальной решетки и рисков возникновения происшествий при интенсивном торможении поездов, а также повышения гарантированного обеспечения безопасности движения, рекомендуется учесть при актуализации Инструкции по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути [13] следующие изменения:

1. Дополнить подпункт 4.2.3 и третий абзац пункта 6.2 приложения 6 следующим содержанием: «Учесть, что при любом виде торможения поездов, вне зависимости от плана линии, следует $\min t_3$ увеличить на 5°C ».

2. Дополнить подпункт 5.1.1 следующим содержанием: «К сложным эксплуатационным условиям относятся участки пути 1 и 2 классов особогрузонапряженных линий «О», с тяжеловесным грузовым движением «Т» и с интенсивным торможением поездов. Особенностью этих участков является повышенное воздействие на бесстыковой путь сил (верти-

кальных, знакопеременных продольных и боковых) от грузовых поездов, наиболее резко проявляющееся в кривых радиусами 800 м и менее ».

3. Дополнить подпункт 5.2.2 следующим содержанием: «В сложных эксплуатационных условиях железобетонные шпалы с повышенным сопротивлением сдвигу поперек оси пути ($5,0\text{ кН/мм}$) укладываются в кривых радиусами 800 м и менее ».

4. Дополнить последний абзац пункта 6.3 приложения 6 следующим содержанием: «Необходимо учесть, что при любом виде торможения поездов, вне зависимости от плана линии, $[\Delta t_y]$ уменьшается на 5°C .

Выводы

Дан обзор существующих подходов к усилению железнодорожного пути. Современные тенденции в проектировании и строительстве железнодорожного пути характеризуются стремлением обеспечить высокую прочность и надежность конструкции, минимизировав затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание.

Усовершенствована методика проектирования усиления бесстыкового пути при наличии фактора торможения. Систематизированы существующие варианты усиления конструкции бесстыкового пути, предложен экспенсивно-интенсивный подход к их выбору.

Рекомендуется включить результаты настоящего исследования в нормативную документацию, регламентирующую проектирование, строительство и эксплуатацию бесстыкового пути, приняв во внимание рекомендации в Инструкцию [13], обозначенные в данной статье.

Перспективой дальнейших исследований по совершенствованию метода расчета устойчивости бесстыкового пути является наиболее полный учет особенностей его эксплуатации и напряженно-деформированного состояния при поездном воздействии: термодинамического воздействия современных поездов, дополнительного нагрева рельсовых плетей при воздействии тяговых токов и интенсивного торможения, температурного градиента и многих других.

Список источников

1. Ашпиз Е. С., Дорошенко К. А. Применение технологии холодного ресайклинга для устройства подбалластных защитных слоев // Путь и путевое хозяйство. 2024. № 11. С. 4–7.
2. Кореньков Д. А., Иванников М. А., Загитов Э. Д. Разработка конструкции и технологий содержания железнодорожного пути, обеспечивающих наработку 2,5 млрд т брутто пропущенного тоннажа // Путь и путевое хозяйство. 2024. № 12. С. 2–6.
3. Ланис А. Л. Армирование основной площадки насыпи с инъектированием твердеющих растворов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2019. № 3 (50). С. 38–46.
4. Применение композитных материалов на железнодорожном транспорте / А. В. Савин, А. И. Борц, И. В. Светозарова, А. А. Дорошкевич // Путь и путевое хозяйство. 2020. № 1. С. 15–17.
5. Щепотин Г. К. Усиление подшпалльного основания в условиях Сибири // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 7. С. 22–24.
6. Величко Д. В., Антонов Н. И., Карюкин М. А. О разработке безрезьбовых скреплений // Путь и путевое хозяйство. 2020. № 6. С. 31–32.
7. Патент на полезную модель № 210218 U1 Российская Федерация, МПК E01B 9/36. Подрельсовая подкладка : № 2021137239 : заявл. 15.12.2021 : опубл. 01.04.2022 / Величко Д. В., Карпушенко Н. И., Карюкин М. А. [и др.] ; заявитель СГУПС.
8. Патент № 2744086 C1 Российская Федерация, МПК E01B 9/14, E01B 9/30, E01B 9/48. Анкерное рельсовое скрепление : № 2020130537 : заявл. 15.09.2020 : опубл. 02.03.2021 / Карюкин М. А., Величко Д. В., Банул В. В. [и др.] ; заявитель СГУПС.
9. Новакович В. И. Верхнее строение железнодорожного пути для высоких скоростей движения поездов // Транспортное строительство. 2024. № 1. С. 2–5.
10. Суслов О. А., Гришина М. А. Расчет оптимальной температуры закрепления рельсовых плетей на основе многофакторного анализа эксплуатационных условий его укладки // Вестник транспорта Поволжья. 2025. № 1 (109). С. 148–153.
11. Стоянович Г. М., Пупатенко В. В., Гильмутдинов С. А. О температуре закрепления бесстыковых плетей на постоянный режим эксплуатации // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2019. № 4 (21). С. 36–39.
12. Пересмотреть Инструкцию по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути / В. И. Новакович, Г. В. Карпачевский, Н. И. Залавский [и др.] // Путь и путевое хозяйство. 2023. № 8. С. 32–33.
13. Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14.12.2016 № 2544р : (ред. от 10.04.2023). Москва, 2017. 176 с.
14. Ардышев И. К. Продольные деформации рельсовых плетей при рекуперативном торможении поездов в суровых климатических условиях // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 2 (69). С. 41–48.
15. Ардышев И. К. Продольные упругие деформации рельсов при торможении поезда в сложных эксплуатационных условиях Сибири // 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 г. Москва : Инфра-М, 2024. С. 536–542.
16. Ардышев И. К. Численное моделирование упругих перемещений рельсовой плети при наличии фактора торможения поездов, ведомых современными локомотивами // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 2 (74). С. 103–109.
17. Лысюк В. С., Сазонов В. Н., Башкатова Л. В. Прочный и надежный железнодорожный путь. Москва : Академкнига, 2003. 589 с.

References

1. Ashpiz E. S., Doroshenko K. A. Using of cold recycling technology for sub-ballast protective layers. *Track and Track Facilities*. 2024;(11):4–7. (In Russ.).
2. Korenkov D. A. [et al.]. Development of design and technologies for maintaining railway track, ensuring the production of 2.5 billion tons of gross tonnage. *Track and Track Facilities*. 2024;(12):2–6. (In Russ.).
3. Lanis A. L. Reinforcement of the main platform of a high embankment with injection of hardening solutions. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2019;(50):38–46. (In Russ.).
4. Savin A. V. [et al.]. Application of composite materials in railway transport. *Track and Track Facilities*. 2020;(1):15–17. (In Russ.).
5. Shchepotin G. K. Strengthening the sleeper base in Siberian conditions. *Track and Track Facilities*. 2021;(7):22–24. (In Russ.).

6. Velichko D. V. [et al.]. On the development of threadless fasteners. *Track and Track Facilities*. 2020;(6):31–32. (In Russ.).
7. Velichko D. V., Karpushchenko N. I., Karyukin M. A. [et al.]. Sub-rail pad. Patent of Russian Federation, no. 210218; 2022. (In Russ.).
8. Karyukin M. A., Velichko D. V., Banul V. V. [et al.]. Anchor rail fastening. Patent of Russian Federation, no. 2744086; 2021. (In Russ.).
9. Novakovich V. I. Track structure for high speed trains movement. *Transport Construction*. 2024;(1):2–5. (In Russ.).
10. Suslov O. A., Grishina M. A. Calculation of the optimal temperature for fixing continuous welded rails based on a multifactorial analysis of the laying operating conditions. *Volga Region Transport Bulletin*. 2025;(109):148–153. (In Russ.).
11. Stoyanovich G. M. [et al.]. Stress-free temperature of continuous welded rail on a regular operating mode. *Transport in the Asia-Pacific Region*. 2019;(21):36–39. (In Russ.).
12. Novakovich V. I. Review the Instructions for the construction, laying, maintenance and repair of CWR. *Track and Track Facilities*. 2023;(8):32–33. (In Russ.).
13. Instruction for the design, installation, maintenance and repair of continuously welded rail track. Approved by Russian Railways 10.04.2023 No. 2544r. 176 p. (In Russ.).
14. Ardyshev I. K. Longitudinal deformations of continuously welded rail track under recuperative braking of trains in inclement climatic conditions. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(69):41–48. (In Russ.).
15. Ardyshev I. K. Longitudinal elastic deformations of rails during train braking in difficult operating conditions of Siberia. *II International Scientific Conference. Railway: Track to the Future. Proceedings of postgraduate students and young scientists materials for the 80th anniversary of the postgraduate school and scientific center. Economics of complex projects and tariff formation, All-Russian Scientific Research Institute of Railway Transport. April 18, 2024, Moscow*. Moscow: Infra-M; 2024. P. 536–542. (In Russ.).
16. Ardyshev I. K. Numerical modeling of continuously welded rails elastic displacements in the presence of a braking factor for trains driven by modern locomotives. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(74):103–109. (In Russ.).
17. Lysyuk V. S., Sazonov V. N., Bashkatova L. V. A strong and reliable railway track. Moscow: Akademkniga; 2003. 589 p. (In Russ.).

Информация об авторах

И. К. Ардышев – преподаватель 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.

Information about the authors

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

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

Статья поступила в редакцию 16.06.2025; одобрена после рецензирования 01.07.2025; принята к публикации 07.07.2025.

The article was submitted 16.06.2025; approved after reviewing 01.07.2025; accepted for publication 07.07.2025.

Научная статья
УДК 620.172.21
doi:10.52170/1815-9265_2025_75_97

Применение метода теневого муара для исследования рельефа пластин

Анатолий Михайлович Попов^{1✉}, Владимир Борисович Зиновьев²,
Сергей Иванович Герасимов³, Виктор Михайлович Тихомиров⁴

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

¹47604@mail.ru[✉]

²vbzinoviev@mail.ru

³gerasimov@stu.ru

⁴twm@stu.ru

Аннотация. Целью данной работы является разработка метода отбраковки полупроводниковых пластин на основе определения их рельефа. Оптические методы исследования, основанные на муаровом эффекте, широко применяются для изучения рельефа различных тел, однако чувствительность традиционных муаровых методов мала для оценки качества полупроводниковых пластин. С этой целью предлагается использовать метод теневого муара с применением высокочастотных растров. В этом случае картину регистрируемых полос некорректно описывать, основываясь на постулатах «механической» интерференции, применяемых в традиционном муаре.

В статье приводится вывод разрешающих уравнений для картин полос, наблюдаемых в первом порядке дифракции, основанный на законах дифракции при прохождении оптических лучей через эталонный растр и их дальнейшей интерференции после отражения от изучаемой поверхности. При выводе уравнений предполагалось, что положение наблюдаемых полос определяется интерференцией волн, дифрагировавших в нулевой и первый порядок дифракции при первом и втором прохождении эталонного растра. Приведены результаты исследования рельефа кремниевых пластин с различными дефектами. Диаметр исследуемых пластин 60 мм, при этом использовался эталонный растр частотой 200 линий на миллиметр. В оптической схеме, применяемой при регистрации муаровых картин, использовался Не-Не лазер ЛГ-38. Представлены эпюры рельефа пластин в выбранных сечениях на основе рельефа их поверхности.

Проведенные исследования показали, что предлагаемая методика позволяет проводить предварительную отбраковку пластин. Размеры исследуемых полупроводниковых пластин ограничиваются размерами применяемых элементов оптической схемы.

Ключевые слова: метод муаровых полос, теневой муар, высокочастотные растры, дифракция, интерференция, кремниевые пластины, рельеф

Для цитирования: Применение метода теневого муара для исследования рельефа пластин / А. М. Попов, В. Б. Зиновьев, С. И. Герасимов, В. М. Тихомиров // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 3 (75). С. 97–103. DOI 10.52170/1815-9265_2025_75_97.

Original article

Application of the shadow moiré method to study the relief of plates

Anatoly M. Popov^{1✉}, Vladimir B. Zinov'yev², Sergey I. Gerasimov³, Victor M. Tikhomirov⁴

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

¹47604@mail.ru[✉]

²vbzinoviev@mail.ru

³gerasimov@stu.ru

⁴twm@stu.ru

Abstract. The purpose of this work is to develop a method for rejecting semiconductor wafers based on determining their relief. Optical research methods based on the moiré effect are widely used to study the relief of various bodies, but the sensitivity of traditional moiré methods is low for assessing the quality of semiconductor wafers. For this purpose, it is proposed to use the shadow moiré method using high-frequency rasters. In this case, it is not correct to describe the pattern of the recorded fringes based on the postulates of “mechanical” interference used in traditional moiré.

The article presents the derivation of resolving equations for patterns of fringes observed in the first order of diffraction, based on the laws of diffraction when optical fibers pass through a reference raster and their further interference after reflection from the surface under study. When deriving the equations, it was assumed that the position of the observed bands is determined by the interference of waves diffracted into the zero and first orders of diffraction during the first and second passage of the reference raster. The results of a study of the relief of flint

wafers with various defects are presented. The diameter of the plates under study was 60 mm, and a reference raster with a frequency of 200 lines per millimeter was used. In the optical scheme used for recording moiré patterns, a He-Ne laser LG-38 was used. Diagrams of the relief of the plates in selected sections based on the relief of their surface are presented.

The conducted studies showed that the proposed method allows for preliminary rejection of plates. The dimensions of the semiconductor wafers under study are limited by the dimensions of the optical circuit elements used.

Keywords: moire fringe method, shadow moiré, high-frequency rasters, diffraction, interference, silicon plate, relief

For citation: Popov A. M., Zinoviev V. B., Gerasimov S. I., Tikhomirov V. M. Application of the shadow moiré method to study the relief of plates. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(75):97–103. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_75_97.

Введение

Развитие железнодорожного транспорта сегодня во многом определяется успешностью внедрения вычислительной техники для управления процессами перевозок и контроля за состоянием подвижного состава и элементов железнодорожного пути. Базой развития электроники и вычислительной техники, робототехники является микроэлектронная промышленность, включающая производство изделий микроэлектроники [1]. Основную часть мирового производства в стоимостном выражении составляет оборудование для производства полупроводниковых пластин – 61,20 млрд долл. (86,1 %) в 2020 г.; существенно меньше доля оборудования для тестирования – 6,01 млрд долл. (8,5 %) [2]. Одним из объектов тестирования является рельеф полупроводниковых пластин [3, 4], для исследования которого используется трудоемкий процесс с применением импортных профилографов [5]. В работе [6] для изучения кремниевых пластин предлагается использовать зеркально-оптический метод; следует отметить, что возможность получения по приведенным картинам [7] достоверных численных результатов вызывает сомнение.

В экспериментальной механике достаточно давно применяются оптические методы [8, 9]. С их помощью можно определить углы наклона исследуемых поверхностей [10], а также их рельеф. В работе [11] впервые был предложен метод исследования рельефа больших объектов, в том числе для диагностики спинальных заболеваний, основанный на проектировании системы полос на исследуемое тело. Данная методика исследования больших объектов получила большое распространение [12, 13].

Для исследования рельефа малых размеров применялся метод теневого муара [14] (рис. 1). В этом случае амплитудный растр

устанавливается в непосредственной близости от поверхности исследуемого изделия, освещается коллимированным белым светом под углом φ , отсчитываемым от нормали к поверхности раstra. Считается, что при наблюдении под углом θ , отсчитываемым от нормали к поверхности раstra, происходит механическое наложение линий эталонной решетки и их теней на поверхности исследуемого объекта, вследствие чего формируется муаровая картина полос.

При расшифровке муаровых картин в традиционном методе теневого муара считают, что положение полос определяется следующим выражением [15]:

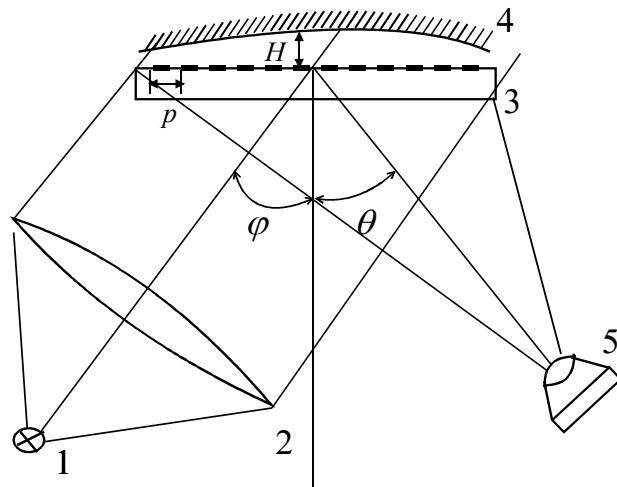
$$H = \frac{Np}{\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \theta},$$

где H – расстояние от эталонной решетки до поверхности изучаемого объекта; N – номер муаровой полосы; φ и θ – углы освещения и наблюдения соответственно; p – расстояние между линиями решетки.

Это уравнение было получено без учета волновых свойств света, что допустимо при применении низкочастотных эталонных решеток. Для повышения чувствительности необходимо использовать решетки с малым шагом p .

Материалы и методы исследования

В случае применения решеток с малым шагом p проявляются волновые свойства света, поэтому для наблюдения картин полос необходимо использовать когерентные источники света. На рис. 2 представлена оптическая схема хода лучей, формирующих картину полос. Эталонная решетка и объект исследования освещаются коллимированным, когерентным пучком света. В этом случае находящаяся на нормали к направлению освещения световые волны колеблются в одной фазе (см. рис. 2, точки A и D). Картину полос ре-



Rис. 1. Схема эксперимента в теневом муаровом методе:
1 – источник белого света; 2 – коллимирующая линза; 3 – эталонная решетка;
4 – исследуемая поверхность; 5 – регистрирующая фотокамера

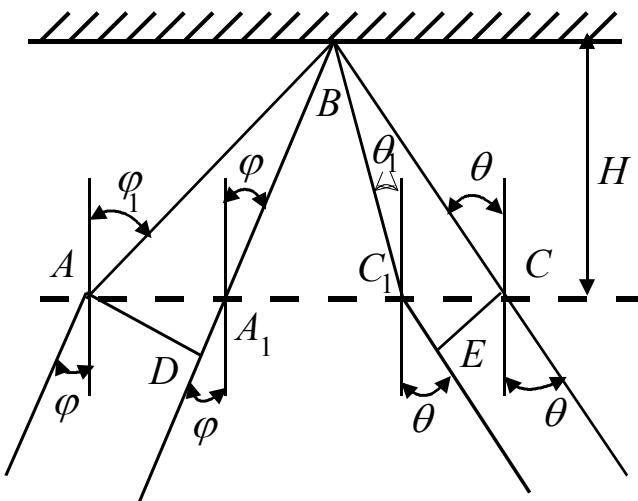


Рис. 2. Расчетная оптическая схема

гистрируются в дифракционных порядках, чаще в первом.

Наибольшую и практически равную интенсивность в первом порядке имеют лучи, проходящие два различных оптических пути. Первый из которых, после того как проходит эталонную решетку, отклоняется в первый порядок дифракции, доходит до поверхности исследуемого тела (отрезок AB , рис. 2), отражается от нее и повторно проходит через эталонную решетку, не изменяя направления (отрезок BC). Другой первый раз проходит через растр, не изменяя направления (отрезок DB), отразившись от поверхности, достигает эталонной решетки (отрезок BC_1) и, проходя через нее, отклоняется в первый дифракционный порядок (отрезок C_1E). При регистрации

картины полос в первом дифракционном порядке или в параллельном пучке она в основном определяется разностью хода этих лучей в точках, расположенных на нормали к направлению наблюдения, т. е. в точках C и E :

$$\Delta = (DA_1 + A_1B + BC_1 + C_1E) - (AB + BC). \quad (1)$$

Используя схему хода лучей, представленную на рис. 2, выразим отрезки, входящие в выражение (1):

$$AB = \frac{H}{\cos \varphi_1}; \quad BC = \frac{H}{\cos \theta};$$

$$A_1B = \frac{H}{\cos \varphi}; \quad BC_1 = \frac{H}{\cos \theta_1};$$

$$DA_1 = AA_1 \sin \varphi = (H \operatorname{tg} \varphi_1 - H \operatorname{tg} \varphi) \sin \varphi;$$

$$C_1E = CC_1 \sin \theta = (H \operatorname{tg} \theta - H \operatorname{tg} \theta_1) \sin \theta.$$

Подставим полученные длины отрезков в выражение (1):

$$\Delta = \left(\frac{H}{\cos \varphi} - \frac{H}{\cos \varphi_1} + \frac{H}{\cos \theta_1} - \frac{H}{\cos \theta} \right) + H(\tan \varphi_1 - \tan \varphi) \sin \varphi + H(\tan \theta - \tan \theta_1) \sin \theta. \quad (2)$$

Выражение в первых скобках описывает картину полос, которая будет наблюдаться как высокочастотный шум. Муаровую картину полос описывают второе и третье слагаемые. Из волновой оптики известно, что при интерференции светлая полоса регистрируется, если разность хода интерферирующих лучей равна целому числу длин волн света. Тогда уравнение, описывающее положение светлых полос, имеет вид:

$$H \frac{\sin(\varphi_1 - \varphi)}{\cos \varphi_1} \tan \varphi + H \frac{\sin(\theta - \theta_1)}{\cos \theta_1} \tan \theta = N\lambda. \quad (3)$$

При записи выражения (3) было учтено, что

$$\tan \varphi_1 - \tan \varphi = \frac{\sin(\varphi_1 - \varphi)}{\cos \varphi \cos \varphi_1},$$

$$\tan \theta_1 - \tan \theta = \frac{\sin(\theta_1 - \theta)}{\cos \theta \cos \theta_1}.$$

Углы в выражении (3) определяются направлением освещения и наблюдения, а также шагом эталонной решетки в первом порядке дифракции, связь между ними имеет вид: $\sin \varphi_1 - \sin \varphi = \frac{\lambda}{p}$ и $\sin \theta - \sin \theta_1 = \frac{\lambda}{p}$.

Если в полученном уравнении расписать синусы радиусов и принять, что $\cos \varphi = \cos \varphi_1$; $\cos \theta = \cos \theta_1$ (что допустимо для эталонных решеток с большим шагом), то можно получить традиционное уравнение теневого муара.

Результаты исследования

Методика использования решеток с малым шагом была применена при изучении рельефа поверхности кремниевых пластин, необходимых для производства полупроводниковых приборов. Оптическая схема собиралась на столе СИН, в качестве источника когерентного света использовался Не-Не лазер ЛГ-38 с длиной волны 0,6328 мкм. На рис. 3 приведены фотографии картин интерференционных полос, зарегистрированных при изучении формы пластин из кремния диаметром

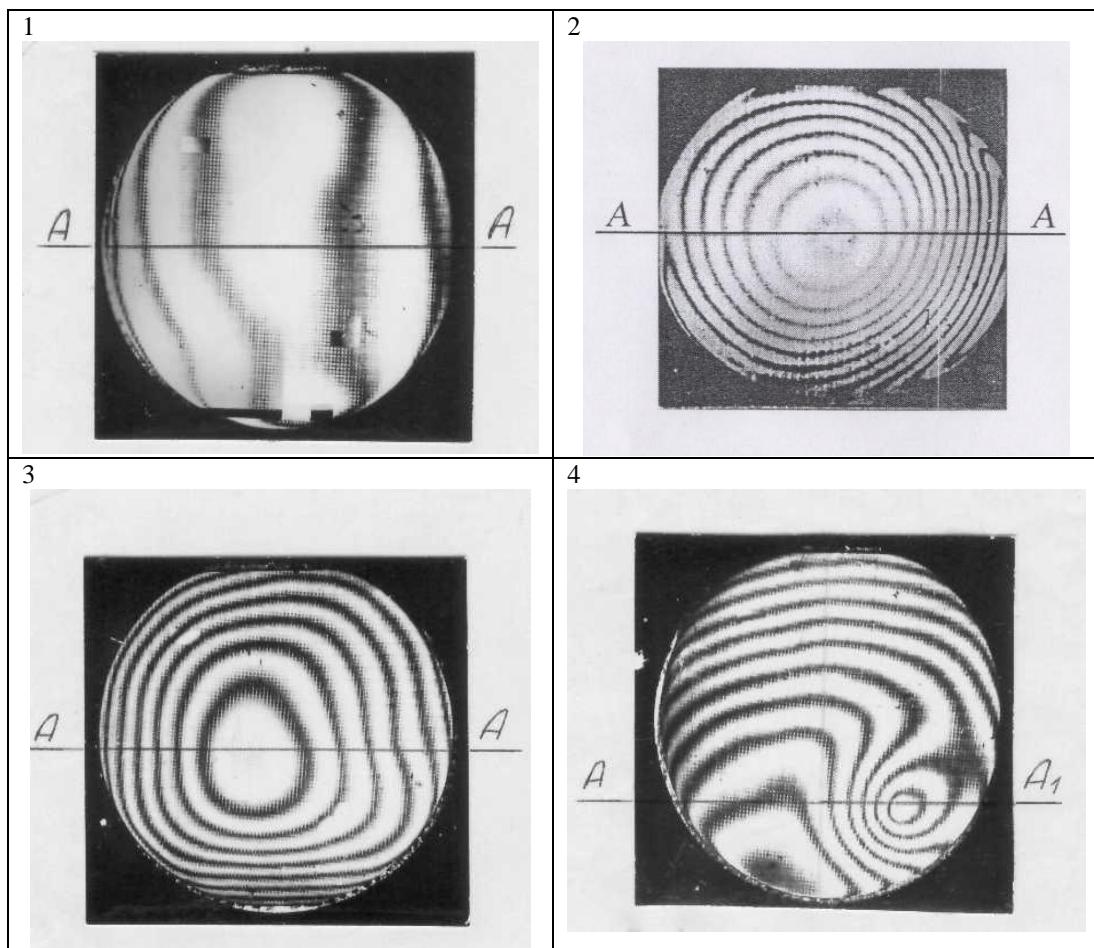


Рис. 3. Фотографии картин интерференционных полос

Н мкм

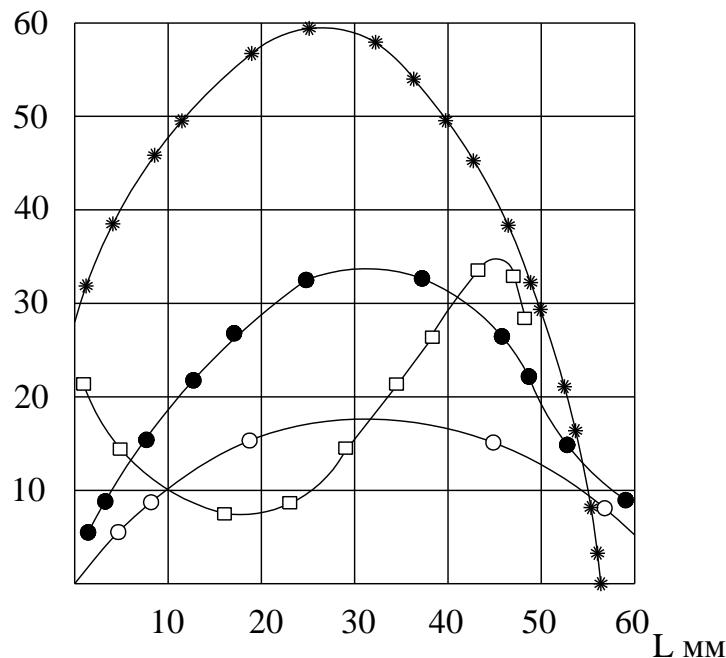


Рис. 4. Рельеф пластин:
○ – рельеф на фотографии 1 (рис. 3); ● – рельеф на фотографии 3 (рис. 3);
* – рельеф на фотографии 2 (рис. 3); □ – рельеф на фотографии 4 (рис. 3)

60 мм. Размер исследуемых пластин был ограничен размером имеющихся в наличии эталонных растров, также размер исследуемого поля может быть ограничен диаметром линзы, применяемой для коллимирования пучка когерентного света.

В качестве примеров выбраны фотографии рельефа пластин с различной величиной и формой отклонения поверхности пластины от плоской. При регистрации муаровых картин использовалась эталонная решетка с шагом полос 5 мкм или частотой 200 мм^{-1} . Картины зарегистрированы в первом дифракционном порядке.

На рис. 4 приведены графики изменения рельефа вдоль сечений, обозначенных $A-A_1$ на рис. 3. С помощью формулы (3) вычислялась цена полосы на картинах полос, она составила порядка 6 мкм.

Выводы

Проведенная работа показала, что использование высокочастотного теневого муара позволяет с точностью до микронов исследовать рельеф пластин, что дает возможность выполнять как предварительный отбор полупроводниковых пластин, так и контроль за их формой в процессе изготовления полупроводниковых приборов.

Список источников

1. Грибков А. А., Зеленский А. А. Приоритеты развития микроэлектронной промышленности России. Часть 1 // Russian Economic Bulletin. 2023. Т. 6, № 6. С. 313–324.
2. Грибков А. А., Зеленский А. А. Приоритеты развития микроэлектронной промышленности России. Часть 2 // Russian Economic Bulletin. 2024. Т. 7, № 1. С. 67–80.
3. Дедкова А. А., Флоринский И. В., Дюжев Н. А. Подходы к определению кривизны пластин по рельефу их поверхности // УФН. 2022 Т. 192, № 7. С. 754–771. DOI 10.3367/UFNr.2021.10.039076.
4. Дедкова А. А., Флоринский И. В. Анализ цифровых моделей рельефа полупроводниковых пластин и структур методами геоморфометрии // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2023. Т. 67, № 2. С. 32–40. DOI 10.30533/GiA-2023-014.
5. Бесконтактные способы и средства комбинированной профилометрии / А. П. Марков, В. Ф. Гоголинский, А. А. Азарко [и др.] // Литье и металлургия. 2010. № 3 (56). С. 84–90.

6. Сенько С. Ф., Зеленин В. А. Оценка размеров топографических дефектов полупроводниковых кремниевых структур // Приборы и методы измерений. 2018. Т. 9, № 1. С. 74–84. EDN YWIGHE.
7. Сенько С. Ф., Сеньков И. С. Зеленин В. А. Количественный контроль топографических дефектов полупроводниковых пластин кремния // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2018. № 5 (115). С. 12–18. EDN XUEFIL.
8. Накладные голографические интерферометры / В. А. Жилкин, Л. А. Борыняк, С. И. Герасимов, В. Б. Зиновьев // Интерференционно-оптические методы механики твердого деформируемого тела и механики горных пород : сборник тезисов. Новосибирск : НИИЖТ, 1985. С. 68.
9. Экспериментальное определение допустимых расстояний между нагелями в древесине / А. М. Попов, В. Б. Зиновьев, Л. И. Ким, Л. А. Сподарева // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2012. № 28. С. 160–167.
10. Study of thin plate bending using the method of holographic moire / A. Popov, V. Zinoviev, S. Nikolaev, A. Sidashov // Journal of Physics: Conference Series. Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021 (IITMM 2021). Gelendzhik, 2021. P. 032020. EDN PQCAHT.
11. Popov A. M., Zinov'ev V. B., Kolesnikov A. V. Optimization of fringe pattern scheme registration in moire topography // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 1996. Vol. 2791. P. 150–155. EDN SLTCEZ.
12. Сарнадский В. Н., Баторов Д. Ю., Щучкина О. А. Сравнение возможностей диагностики сколиоза при скрининге школьников методами оптической топографии и видеорастерстереографии с использованием топографов ТОДП и FORMETRIC // Хирургия позвоночника. 2023. Т. 20, № 1. С. 16–27. EDN QTGNJU.
13. Скрининг диагностика осанки у лиц, занимающихся художественной гимнастикой, по данным компьютерно-оптической топографии / Н. М. Бикчурин, Ф. В. Тахавиева, О. Р. Радченко, Е. М. Акишин // Практическая медицина. 2023. Т. 21, № 3. С. 55–59.
14. Дюрелли А., Паркс В. Анализ деформаций с использованием муара. Москва : Мир, 1974. 360 с.
15. Сухарев И. П., Ушаков Б. Н. Исследование деформаций и напряжений методом муаровых полос. Москва : Машиностроение, 1969. 208 с.

Reference

1. Gribkov A. A., Zelensky A. A. Priorities for the development of the microelectronic industry in Russia. Part 1. *Russian Economic Bulletin*. 2023;6(6):313–324. (In Russ.).
2. Gribkov A. A., Zelensky A. A. Priorities for the development of the microelectronic industry in Russia. Part 2. *Russian Economic Bulletin*. 2024;7(1):67–80. (In Russ.).
3. Dedkova A. A., Florinsky I. V., Dyuzhev N. A. Approaches to determining the curvature of plates from their surface relief. *UFN*. 2022;192(7):754–771. (In Russ.). DOI 10.3367/UFNr.2021.10 .039076.
4. Dedkova A. A., Florinsky I. V. Analysis of digital relief models of semiconductor wafers and structures using geomorphometry methods. *News of Universities. Geodesy and Aerial Photography*. 2023;67(2):32–40. (In Russ.). DOI 10.30533/GiA-2023-014.
5. Markov A. P. [et al.] Non-contact methods and means of combined profilometry. *Casting and Metallurgy*. 2010;(56):84–90. (In Russ.).
6. Senko S. F., Zelenin V. A. Estimation of the sizes of topographic defects in semiconductor silicon structures. *Instruments and Methods of Measurement*. 2018;9(1):74–84. (In Russ.).
7. Senko S. F., Senkov I. S., Zelenin V. A. Quantitative monitoring of topographic defects in silicon semiconductor wafers. *Reports of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics*. 2018;(115):12–18. (In Russ.).
8. Zhilkin V. A., Borynyak L. A., Gerasimov S. I., Zinovyev V. B. Surface-mounted holographic interferometers. *Interference-optical Methods of Mechanics of Solid Deformable Bodies and Mechanics of Rocks. Collection of abstracts*. 1985. P. 68. (In Russ.).
9. Popov A. M., Zinovyev V. B., Kim L. I., Spodareva L. A. Experimental determination of permissible distances between dowels in wood. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2012;(28):160–167. (In Russ.).
10. Popov A., Zinovyev V., Nikolaev S., Sidashov A. Study of thin plate bending using the method of holographic moire. *Journal of Physics: Conference Series. Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021 (IITMM 2021)*. Gelendzhik; 2021. P. 032020.
11. Popov A. M., Zinovyev V. B., Kolesnikov A. V. Optimization of fringe pattern registration in moire topography. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. 1996;2791:150–155.

12. Sarnadsky V. N., Batorov D. Yu., Shchuchkina O. A. Comparison of the possibilities of diagnosing scoliosis when screening schoolchildren using optical topography and video raster stereography using TODP and FORMETRIC topographers. *Spine Surgery*. 2023;20(1):16–27. (In Russ.).
13. Bikchurin N. M., Takhavieva F. V., Radchenko O. R., Akishin E. M. Screening diagnostics of posture in persons involved in rhythmic gymnastics, according to computer-optical topography data. *Practical Medicine*. 2023;21(3):55–59. (In Russ.).
14. Durelli A., Parks W. Deformation analysis using moiré. Moscow: Mir; 1974. 360 p. (In Russ.).
15. Sukharev I. P., Ushakov B. N. Study of deformations and stresses using the moire stripe method. Moscow: Mechanical Engineering; 1969. 208 p. (In Russ.).

Информация об авторах

А. М. Попов – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая механика» Сибирского государственного университета путей сообщения.

В. Б. Зиновьев – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Теоретическая механика» Сибирского государственного университета путей сообщения.

С. И. Герасимов – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительная механика» Сибирского государственного университета путей сообщения.

В. М. Тихомиров – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Строительная механика» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

A. M. Popov – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Theoretical Mechanics Department, Siberian Transport University.

V. B. Zinovyev – Candidate of Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Theoretical Mechanics Department, Siberian Transport University.

S. I. Gerasimov – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Structural Mechanics Department, Siberian Transport University.

V. M. Tikhomirov – Doctor of Engineering, Associate Professor, Professor of the Structural Mechanics Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 19.08.2025; одобрена после рецензирования 20.08.2025; принята к публикации 21.08.2025.

The article was submitted 19.08.2025; approved after reviewing 20.08.2025; accepted for publication 21.08.2025.

Научная статья

УДК 693.625

doi:10.52170/1815-9265_2025_75_104

Ремонт фасадов зданий при неблагоприятных климатических условиях с использованием инфракрасных нагревателей

Игорь Юрьевич Шелехов¹, Игорь Вячеславович Алтухов²,
Ирина Жаргаловна Дугаржапова³, Антон Александрович Батурина⁴,
Вадим Дансарунович Очиров^{5✉}

^{1, 3, 4}Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

^{2, 5}Иркутский государственный аграрный университет имени А. А. Ежевского, Молодежный, Россия

¹ promteplo@yandex.ru

² altukhigor@yandex.ru

³ zdugarz3012@gmail.com

⁴ antonbaturin5@gmail.com

⁵ ochirov@igsha.ru✉

Аннотация. Общий комплекс мероприятий по эксплуатации зданий подразумевает обеспечение сохранности внешнего вида их фасада, в том числе отсутствие на нем трещин, расслоения и осыпания штукатурки, отколов, выбоин и других механических повреждений. Цель проведенного исследования заключалась в оптимизации технологических циклов производства штукатурных работ, осуществляемых при ремонте фасадов зданий различного назначения. Лабораторные и натурные исследования показали, что применение инновационных методов позволяет увеличить качество ремонтных работ в независимости от погодных условий.

Для проведения исследований была разработана программа испытаний на основе существующих стандартов, применены современные приборы, производимые компанией «ОВЕН», с помощью которых проводился контроль электрофизических параметров инфракрасных нагревательных элементов, температурных параметров штукатурного раствора и его механических свойств. Изучено изменение физических свойств штукатурных материалов, а именно: зависимость количества образования различных дефектов от воздействия климатических факторов на процесс твердения штукатурной смеси, воздействие климатических факторов на готовое штукатурное покрытие, а также влияние химического состава воды на качество штукатурной смеси.

Проведенные эксперименты показали, что применение инфракрасных нагревательных элементов с теплоизоляционным слоем может создать с минимальными временными и материальными затратами благоприятную климатическую среду, при которой производство фасадных работ будет осуществляться с высоким качеством независимо от погодных условий. Используя разработанные инфракрасные нагревательные элементы, можно изготавливать мобильные, переносные конструкции, позволяющие обеспечить высокое качество ремонтных работ и снижение их себестоимости.

Ключевые слова: штукатурная смесь, климатические факторы, морозостойкие добавки, гибкий нагревательный элемент, ремонт фасадов

Для цитирования: Ремонт фасадов зданий при неблагоприятных климатических условиях с использованием инфракрасных нагревателей / И. Ю. Шелехов, И. В. Алтухов, И. Ж. Дугаржапова [и др.] // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 3 (75). С. 104–112. DOI 10.52170/1815-9265_2025_75_104.

Original article

Repair of building facades in adverse climatic conditions using infrared heaters

Igor Yu. Shelekhov¹, Igor V. Altukhov², Irina Zh. Dugarzhapova³, Anton A. Baturin⁴,
Vadim D. Ochirov^{5✉}

^{1, 3, 4}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

^{2, 5}Irkutsk State Agrarian University named after A. A. Ezhevsky, Molodezhny, Russia

¹ promteplo@yandex.ru

² altukhigor@yandex.ru

³ zdugarz3012@gmail.com

⁴ antonbaturin5@gmail.com

⁵ ochirov@igsha.ru✉

Abstract. The general set of measures for the operation of buildings implies ensuring the preservation of the facade appearance, including the absence of cracks, delamination and crumbling of plaster, chips, potholes and other mechanical damage on the building facade. The paper contains studies aimed at optimizing the technological cycles of plastering work carried out during the repair of building facades for various purposes. Laboratory and field studies have shown that the use of new innovative methods can improve the quality of repair work regardless of weather conditions.

To conduct the research, a test program was developed based on existing standards, modern devices manufactured by OWEN were used, with the help of which the electrophysical parameters of infrared heating elements, temperature parameters of the plaster solution and its mechanical properties were monitored. The change in the physical properties of plaster materials was studied, namely the amount of formation of various defects depending on the impact of climatic factors on the hardening process of the plaster mix, the impact of climatic factors on the finished plaster coating, as well as the effect of the chemical composition of water on the quality of the plaster mix.

The experiments showed that the use of infrared heating elements with a heat-insulating layer can create a favorable climatic environment with minimal time and material costs, in which the production of facade works will be carried out with high quality regardless of weather conditions. Using the developed infrared heating elements, it is possible to manufacture mobile, portable structures that allow for high quality repair work and a reduction in the cost of work.

Keywords: plaster mix, climatic factors, frost-resistant additives, flexible heating element, facade repair

For citation: Shelekhov I. Yu., Altukhov I. V., Dugarzhapova I. Zh., Baturin A. A., Ochirov V. D. Repair of building facades in adverse climatic conditions using infrared heaters. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(75):104–112. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_75_104.

Введение

Общий комплекс мероприятий по эксплуатации зданий подразумевает обеспечение сохранности внешнего вида фасада, в том числе отсутствие на нем трещин, расслоения и осипания штукатурки, отколов, выбоин и других механических повреждений. Вовремя не отремонтированные дефекты, особенно в межсезонный период, могут со временем ухудшить ситуацию, так как при попадании влаги на фасад она проникает внутрь стены, при понижении наружной температуры ниже нуля градусов вода замерзает, увеличивая дефект, образовывая микротрещины в стене, тем самым ухудшая теплотехнические свойства ограждающих конструкций. Ремонт таких дефектов осуществляется бетонными смесями, в том числе при отрицательных температурах [1–3] и различными штукатурными материалами [4–6]. В период повышенной влажности и пониженных температур штукатурный слой, в отличие от бетонных смесей, не всегда приобретает необходимую твердость и обеспечивает необходимую адгезию к поверхности, а при неравномерном высыхании в нем образуются трещины и вспучивания [7].

Из общего спектра выполняемых при строительстве и ремонте зданий работ [8], особенно в зимний период, штукатурные относятся к разряду сложных и многофункциональных. При их осуществлении, кроме метеорологических условий, необходимо учитывать тип здания и вид поверхности фасада, текущие условия его эксплуатации и теплоакку-

мулирующие свойства применяемых материалов [9]. Расчет оптимальных параметров технологического процесса ремонта фасада, подбор дополнительной технологической оснастки обеспечит качество выполняемых работ. Зная состав штукатурной смеси, можно определить температурный диапазон ее применения или разработать мероприятия по его увеличению. Для производства штукатурных работ при пониженных температурах производятся специальные штукатурные растворы с морозостойкими добавками [10, 11], также в раствор добавляют материалы для увеличения теплоизоляционных свойств [12–15]. После нанесения таких растворов на фасад здания снижается теплоотдача от ограждающих конструкций, стабилизируется температурный режим, штукатурные растворы приобретают более стойкие механические характеристики. Используя данные штукатурные материалы, возможно снизить сопутствующие затраты на проведение ремонтных работ. Для этого необходимо вести работы по оптимизации технологических циклов ремонта фасадов зданий в зависимости от различных внешних и внутренних факторов.

Цель работы заключается в оптимизации технологических циклов производства штукатурных работ, осуществляемых при ремонте фасадов зданий различного назначения.

Материалы и методы исследования

Качественные характеристики штукатурного покрытия определяются по ГОСТ Р 57984–2017, ГОСТ 28089–2012, ГОСТ 28574–2014, СП 71.13330.2017, в редких случаях применяются

дополнительные устройства [16], которые помогают упростить и оптимизировать процесс его нанесения. В наших исследованиях использован адгезиметр электронный марки ПСО-50МГ4А для определения величины адгезии, при этом необходимо оценивать общую площадь дефектов. При неравномерном процессе твердения возникают напряжения, которые создают различные микродефекты, тем самым снижая качество покрытия и срок эксплуатации. Необходимое качество штукатурного покрытия, наносимого при пониженной температуре, можно обеспечить соблюдением благоприятного режима застывания в начальный период с последующей выдержкой в течение 7 сут. В период твердения штукатурной смеси из-за изменения параметров теплоемкости и теплопроводности [17] необходимо обеспечивать дополнительную защиту от тепловых потерь и обеспечить дополнительный равномерный нагрев. Для этого нами применены инфракрасные нагревательные элементы [18] с дополнительным теплоизоляционным слоем, которые производятся малым инновационным предприятием ООО «Промышленные Технологические Инновации» (г. Иркутск). Внешний вид инфракрасного нагревательного элемента представлен на рис. 1. Аналогичные инфракрасные нагревательные элементы широко применяют в процессе зимнего бетонирования [19], где они себя хорошо зарекомендовали. Контроль температурных параметров осуществлялся 8-канальным измерителем температуры марки «ОВЕН» TPM138, электрофизические характеристики инфракрасных нагревательных элементов контролировались прибором «ОВЕН» ИМС-Ф1.Щ1.

Традиционно штукатурные работы проводятся с использованием сухих строительных смесей, затворяемых обычной водопроводной водой. Однако, когда речь заходит о выполнении работ в условиях пониженных температур, стандартный подход требует модификации. В таких ситуациях на помощь приходят специально разработанные водные растворы, которые позволяют сохранить реологические и прочностные характеристики строительных смесей, несмотря на неблагоприятное воздействие холода. При отрицательных температурах вода в составе штукатурного раствора начинает замерзать. Этот процесс приводит к ряду негативных последствий: нарушению структуры, замедлению гидратации цемента, изменению реологических характеристик. Для преодоления этих проблем используются специальные добавки, которые изменяют свойства воды, делая ее пригодной для использования в условиях пониженных температур.

Например, хлорированная вода, содержащая растворенные хлориды, такие как хлорид натрия (NaCl) или хлорид кальция (CaCl_2), является одним из наиболее распространенных решений. Принцип ее действия основан на понижении температуры замерзания воды: чем выше концентрация растворенных солей, тем ниже температура, при которой вода кристаллизуется. Кроме того, хлориды играют важную роль в ускорении процесса гидратации цемента. Они выступают в качестве катализаторов, интенсифицируя химические реакции между цементом и водой, что позволяет смеси набирать прочность даже при отрицательных температурах. Также широко используется аммиачная вода;

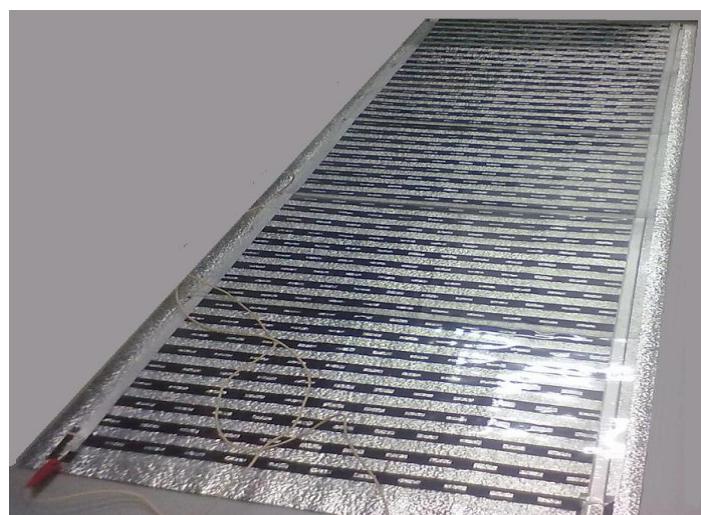


Рис. 1. Гибкий нагревательный элемент марки НЭПП-150-220

аммиак, растворяясь в воде, снижает ее склонность к кристаллизации. Аммиачная вода способствует стабилизации процессов твердения цементных композиций. Она может влиять на структуру образующихся гидратных соединений, делая их более устойчивыми к воздействию низких температур. Это обеспечивает более равномерный и предсказуемый набор прочности. Кроме этого, еще одним эффективным модификатором для штукатурных смесей, работающих в условиях пониженных температур, является карбонат калия, известный также как поташ (K_2CO_3), обеспечивающий повышенную щелочность, которая интенсифицирует кинетику схватывания и твердения цементных композиций. Это означает, что смесь быстрее начинает набирать начальную прочность, что особенно важно при низких температурах, когда естественные процессы замедлены.

Для проведения экспериментов была выбрана сухая строительная смесь для фасадных работ на цементной основе с минимальной температурой применения +5 °C марки Knauf «Виртон», которая приготавливается: 1) на водопроводной воде; 2) на хлорированной воде; 3) на аммиачной воде; 4) на воде с добавлением карбоната калия (поташа). Растворы наносились на керамические подложки размером 300×100 мм² (рис. 2).

Результаты исследования

Нами были проведены эксперименты по образованию различных дефектов в штукатурном слое под влиянием климатических

факторов на процесс твердения штукатурной смеси, в зависимости от химического состава воды и от температурного воздействия.

В первом эксперименте штукатурный раствор наносился и выдерживался в течение 7 сут при температуре +18 °C. После этого образцы насыщались влагой, выдерживались в течение суток и помещались в климатическую камеру, где они подвергались термоциклизации в диапазоне температур от -15 до +25 °C в течение 10 сут. Обследование показало, что на поверхности образцов не было обнаружено трещин, расслоения и других повреждений. Аналогичный результат был получен при нанесении штукатурного раствора при температуре +5 °C.

В втором эксперименте штукатурный раствор наносился и выдерживался в течение 7 сут при температуре -5 °C. После этого образцы также насыщались влагой при температуре +10 °C, выдерживались в течение суток и помещались в климатическую камеру, где они подвергались термоциклизации в диапазоне температур от -15 до +25 °C в течение 10 сут. В табл. 1 представлены результаты обследования.

В третьем эксперименте штукатурный раствор наносился при температуре -5 °C и помещался в климатическую камеру на 7 сут, где с циклом 8 ч температура поэтапно понижалась до температуры -10 °C, а затем повышалась до +10 °C. После этого образцы выдерживались при комнатной температуре 5 ч и насыщались влагой, выдерживались в течение суток. Затем они также помещались в климатическую



Рис. 2. Процесс нанесения растворов на керамические подложки

камеру, где подвергались термоциклированию в диапазоне температур от -15 до $+25$ °C в течение 10 сут. Во второй части табл. 1 представлены результаты обследования.

Рисунок 3 иллюстрирует состояние образца штукатурного раствора, приготовленного с использованием водопроводной воды, после завершения третьего эксперимента. В рамках данного исследования образцы в процессе своего твердения подвергались температурному воздействию, опускавшемуся ниже регламентированного значения (до -10 °C); последующим циклическим климатическим нагрузкам, предназначенным имитировать реальные условия эксплуатации без наличия защитного слоя.

Эксперимент был спланирован таким образом, чтобы воспроизвести наиболее неблагоприятные условия, характерные для проведения фасадных работ в межсезонный период.

В то время как прочие образцы, несмотря на наличие значительных дефектов, сохранили потенциал к восстановлению путем нанесения дополнительного штукатурного слоя, образец, приготовленный на водопроводной воде, претерпел практически полное разрушение. Это наглядно демонстрирует его низкую устойчивость к агрессивным внешним воздействиям.

В четвертом эксперименте штукатурный раствор наносился на предварительно нагретую до $+20$ °C поверхность при температуре окружающего воздуха -10 °C и через 3 ч был закрыт инфракрасным нагревательным элементом марки НЭПП-150-220 с теплоизоляционным слоем. Выдержка в течение 3 ч была обусловлена тем, что в реальной ситуации процесс установки нагревателя, его подключения тоже будет занимать определенный промежуток времени. Величина в 3 ч выбрана как самая неблагоприят-

Результаты обследования штукатурных растворов

Таблица 1

Штукатурный раствор Knauf «Виртон»	Трешины, шт.	Трешины, % от общей площади	Расслоения, шт.	Расслоения, % от общей площади
Эксперимент 2				
На водопроводной воде	8	22	5	26
На хлорированной воде	1	11	2	5
На аммиачной воде	0	0	1	7
На воде с добавлением карбоната калия (поташа)	2	7	1	9
Эксперимент 3				
На водопроводной воде	20	45	40	60
На хлорированной воде	4	18	2	31
На аммиачной воде	2	12	4	17
На воде с добавлением карбоната калия (поташа)	3	16	3	24



Рис. 3. Образец, изготовленный на водопроводной воде, после проведения эксперимента 3

ная. Температура на поверхности штукатурного слоя поддерживалась в диапазоне +5 °C в течение 7 сут, при этом средняя удельная мощность нагрева составила 80 Вт/м² при изменении внешней температуры в диапазоне от –15 до –23 °C. После аналогичных испытаний, которым подвергались образцы в предыдущих экспериментах, было проведено обследование, которое показало, что на поверхности образцов нет трещин, расслоений и других повреждений.

Анализ данных сводной табл. 2 демонстрирует, что в условиях благоприятного климата добавление специальных водных растворов не оказывает существенного влияния на процесс затвердевания штукатурного раствора. При понижении температуры до –5 °C штукатурные смеси на основе обычной воды сохраняют способность к восстановлению путем нанесения дополнительного слоя. Штукатурные растворы, приготовленные с использованием специальных водных растворов, даже при наличии небольших повреждений демонстрируют сохранение своих эксплуатационных характеристик и с высокой долей вероятности соответствуют заявленному гарантийному сроку службы. Однако при температурах до –5 °C применение штукатурных смесей на обычной водной основе не рекомендуется. В то же время смеси на специальных водных растворах, используемые в этих условиях, могут привести к образованию дефектов на покрытии, требующих последующего восстановления. При создании искусственно благоприятных климатических условий с помощью инфракрасных нагревательных элементов использование специальных водных растворов становится излишним. Все исследованные растворы, включая те, что приготовлены на водопроводной воде, успешно твердеют без образования дефектов и не подвержены негативному влиянию внешних климатических факторов в процессе эксплуатации.

Выводы

Проведенные исследования показали, что специальные водные растворы не оказывают значимого влияния на процесс твердения штукатурного раствора в благоприятных климатических условиях.

Штукатурные смеси на водопроводной воде сохраняют способность к восстановлению путем нанесения дополнительного слоя, не рекомендуются к применению при температурах до –15 °C, так как подвержены разрушению.

Штукатурные смеси на специальных водных растворах демонстрируют незначительные повреждения, но при этом сохраняют функциональные характеристики и обладают высокой вероятностью сохранения эксплуатационных свойств в течение гарантийного срока. В процессе эксплуатации в них могут образовываться дефекты, требующие восстановительных мероприятий.

При использовании инфракрасных нагревательных элементов, обеспечивающих оптимальные климатические условия, все исследуемые растворы (включая смеси на водопроводной воде) твердеют без образования дефектов. Готовые покрытия не подвержены негативному влиянию внешних климатических факторов в период эксплуатации, при этом необходимость применения специальных водных растворов отсутствует.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие заключения:

1. В стандартных условиях эксплуатации специальные водные растворы не оказывают существенного влияния на процесс твердения.

2. При температурах до –5 °C предпочтительным является использование растворов на специальных водных основах, несмотря на возможные локальные дефекты.

3. В условиях искусственного терmostатирования применение специализированных составов нецелесообразно, так как все типы растворов демонстрируют стабильное твердение без деградации.

Таблица 2

Сводная таблица результатов обследования штукатурных растворов, %

Штукатурный раствор Knauf «Виртон»	Эксперимент			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
На водопроводной воде	0	26	60	0
На хлорированной воде	0	5	31	0
На аммиачной воде	0	7	17	0
На воде с добавлением карбоната калия (поташа)	0	9	24	0

Данные выводы могут быть использованы для оптимизации выбора штукатурных смесей в зависимости от климатических условий проведения работ.

Проведенные эксперименты показали, что ремонт фасадов штукатурными растворами удовлетворяет всем требованиям при благоприятной внешней климатической обстановке. Применение инфракрасных нагревательных элементов с теплоизоляционным слоем в несколько раз дешевле, чем применение метода «тепляка» с тепловентиляторами. Общие затраты на 1 м² составили 13,44 кВт. Даже при использовании самого

дорогого тарифа на электрическую энергию стоимость работ будет меньше, чем с применением морозостойких добавок, а с учетом того, что ряд этих добавок отрицательно влияет на здоровье рабочего персонала и требует применения дополнительных средств защиты, то использование новых технологий при производстве ремонтных работ необходимо внедрять в реальное производство. Используя данные нагревательные элементы, можно изготавливать мобильные, переносные конструкции, позволяющие обеспечить высокое качество ремонтных работ и снижение их себестоимости.

Список источников

1. Зимнее бетонирование / И. В. Попов, М. Д. Медянкин, М.-Б. Х. Кодзоев, А. А. Евтишкин // Технология и организация строительного производства. 2017. № 4. С. 15–17. EDN NEAQCH.
2. Шелехов И. Ю., Дорофеева Н. Л., Казазаева А. Ю. Исследование термодинамических процессов в бетонной смеси, затвердевающей в зимних условиях // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2021. Т. 11, № 1. С. 126–133. EDN ERUSHV.
3. Бобровская А. С., Титов М. М. Изучение методов оценки надежности технологических процессов при зимнем бетонировании // Colloquium-Journal. 2019. № 18-2 (42). С. 21–22. EDN MNQBUA.
4. Чугунов А. С., Точинов Д. С. Фасадная силиконовая штукатурка: сравнительный анализ с классической штукатуркой // Роль молодых ученых и исследователей в решении актуальных задач АПК : материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и обучающихся. Санкт-Петербург – Пушкин, 2020. Ч. II. С. 130–133. EDN XISXUX.
5. Василик П. Г., Голубев И. В. Штукатурка для ликвидации трещин в фасадах зданий // Сухие строительные смеси. 2014. № 5. С. 28–31. EDN TFRFZD.
6. Стеценко С. Е. Учет выбора покрытий фасадных поверхностей при малоэтажном строительстве // Малоэтажное строительство в рамках Национального проекта «Доступное и комфортное жилье гражданам России: технологии и материалы, проблемы и перспективы развития в Волгоградской области» : материалы международной научно-практической конференции. Волгоград, 2009. С. 419–421. EDN RTRMUI.
7. Причины образования трещин в штукатурке неотапливаемых каменных зданий / С. С. Зимин, Р. А. Горшков, И. А. Войлоков, С. В. Корниенко // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17, № 10. С. 1297–1306. EDN QOIDVT.
8. Анализ производства строительных работ в зимний период времени / И. Ю. Шелехов, Е. И. Смирнов, С. А. Пакулов, М. М. Главинская // Современные научноемкие технологии. 2017. № 6. С. 99–102. EDN ZBKPFX.
9. Теплофизические свойства фазопереходных теплоаккумулирующих материалов, применяемых в строительстве / И. О. Аймбетова, У. С. Сулейменов, М. А. Камбаров [и др.] // Успехи современного естествознания. 2018. № 12. С. 9–13. EDN YUIZUL.
10. Спасибко В. Ю. Зимние растворы ОСНОВИТ и другие новинки марки // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2013. № 11 (178). С. 10–11.
11. Белых С. А., Зырянов Д. П. Оптимизация состава штукатурки на цементной основе с применением полистирола // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 2. С. 128–132. EDN ESXVOJ.
12. Сравнение свойств теплоизоляционных штукатурок с различными наполнителями / П. И. Постникова, И. В. Цыгвинцев, А. Гильмутдинова и [др.] // Синергия Наук. 2017. № 17. С. 594–610. EDN ZWUBKL.
13. Лысакова Д. Д. Теплоизоляционная штукатурка – современный отделочный материал // Образование, наука, производство : материалы VIII Международного молодежного форума. Белгород, 2016. С. 1151–1154. EDN TBLYYP.
14. Теплая штукатурка. Утеплитель для стен дома / С. Д. Козлов, В. Г. Коридзе, А. В. Бондарь, А. О. Чайковский // Бюллетень науки и практики. 2017. № 5 (18). С. 112–115. EDN YNBKLZ.
15. Газаров А. Р. Теплая штукатурка для отделки фасада // Наука, образование и культура. 2019. № 8 (42). С. 19–20. EDN CWKCZX.
16. Авторское свидетельство № 59158 А1 СССР. Способ определения прочности сцепления штукатурки с покрытой ею поверхностью : № 29958 : заявл. 19.02.1940 : опубл. 28.02.1941 / Курик Н. М. 2 с.

17. Варгафтик Н. Б. Термофизические свойства веществ : справочник. Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1956. 367 с.
18. Патент № 2713729 С1 Российская Федерация. Нагревательный элемент широкого спектра применения : № 2018116517 : заявл. 03.05.2018 : опубл. 07.02.2020 / Шелехов И. Ю. 12 с. EDN NSFAST.
19. Гордеев-Гавриков В. К., Сысоев А. К., Сысоева Н. А. Технология зимнего бетонирования с помощью гибких нагревательных систем // Строительство-2004 : материалы юбилейной международной научно-практической конференции. Ростов-на-Дону, 2004. С. 42–43. EDN TLJOZI.

References

1. Popov I. V., Medyankin M. D., Kodzoev M. B. Kh., Evtishkin A. A. Winter concreting. *Technology and Organization of Construction Production*. 2017;(4):15–17. (In Russ.).
2. Shelekhov I. Yu., Dorofeeva N. L., Kazaeva A. Yu. Study of thermodynamic processes in concrete mix hardening in winter conditions. *News of Universities. Investments. Construction. Real estate*. 2021;11(1):126–133. (In Russ.).
3. Bobrovskaya A. S., Titov M. M. Study of methods for assessing the reliability of technological processes during winter concreting. *Colloquium-Journal*. 2019;(42):21–22. (In Russ.).
4. Chugunov A. S., Tochinov D. S. Facade silicone plaster: comparative analysis with classical plaster. *The role of young scientists and researchers in solving urgent problems of the agro-industrial complex: proceedings of the international scientific and practical conference of young scientists and students*. St. Petersburg-Pushkin; 2020. Part 2. P. 130–133. (In Russ.).
5. Vasilik P. G., Golubev I. V. Plaster for eliminating cracks in building facades. *Dry Building Mixtures*. 2014;(5):28–31. (In Russ.).
6. Stetsenko S. E. Taking into account the choice of facade surface coatings in low-rise construction. *Low-rise construction within the framework of the National Project 'Affordable and Comfortable Housing for Citizens of Russia: Technologies and Materials, Problems and Development Prospects in the Volgograd Region': Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Volgograd; 2009. P. 419–421. (In Russ.).
7. Zimin S. S., Gorshkov R. A., Voilokov I. A., Kornienko S. V. Causes of Cracks in the Plaster of Unheated Stone Buildings. *Bulletin of Moscow State University of Civil Engineering*. 2022;17(10):1297–1306. (In Russ.).
8. Shelekhov I. Yu., Smirnov E. I., Pakulov S. A., Glavinskaya M. M. Analysis of Construction Work in Winter. *Modern Science-Intensive Technologies*. 2017;(6):99–102. (In Russ.).
9. Aimbetova I. O., Suleimenov U. S., Kambarov M. A. [et al.] Thermophysical properties of phase-transition heat-accumulating materials used in construction. *Advances in Modern Natural Science*. 2018;(12):9–13. (In Russ.).
10. Spasibko V. Yu. OSNOVIT winter solutions and other new products of the brand. *Construction Materials, Equipment, Technologies of the XXI Century*. 2013;(178):10–11. (In Russ.).
11. Belykh S. A., Zyryanov D. P. Optimization of the composition of cement-based plaster using polystyrene. *Transactions of Bratsk State University. Series: Natural and Engineering Sciences*. 2019;2:128–132. (In Russ.).
12. Postnikova P. I., Tsygvintsev I. V., Gilmutdinova A. [et al.]. Comparison of the properties of thermal insulation plasters with different fillers. *Synergy of Sciences*. 2017;(17):594–610. (In Russ.).
13. Lysakova D. D. Thermal insulation plaster – a modern finishing material. *Education, science, production: proceedings of the VIII International youth forum*. Belgorod; 2016. P. 1151–1154. (In Russ.).
14. Kozlov S. D., Koridze V. G., Bondar A. V., Tchaikovsky A. O. Warm plaster. Insulation for house walls. *Bulletin of Science and Practice*. 2017;(18):112–115. (In Russ.).
15. Gazarov A. R. Warm plaster for facade finishing. *Science, Education and Culture*. 2019;(42):19–20. (In Russ.).
16. Author's Certificate No. 59158 A1 USSR. Method for Determining the Adhesion Strength of Plaster to the Surface Covered Therewith / N. M. Kurik; No. 29958: declared 19.02.1940, published 28.02.1941. 2 p. (In Russ.).
17. Vargaftik N. B. Thermophysical properties of substances: handbook. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat; 1956. 367 p. (In Russ.).
18. Patent 2713729 С1 Russian Federation. Heating element of a wide range of applications / I. Yu. Shelekhov; No. 2018116517: declared. 03.05.2018: published. 07.02.2020. 12 p. (In Russ.).
19. Gordeev-Gavrikov V. K., Sysoev A. K., Sysoeva N. A. Technology of winter concreting using flexible heating systems. *Construction-2004: Proceedings of the Jubilee International Scientific and Practical Conference*. Rostov-on-Don; 2004. P. 42–43. (In Russ.).

Информация об авторах

И. Ю. Шелехов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Городское строительство и хозяйство» Иркутского национального исследовательского технического университета.

И. В. Алтухов – доктор технических наук, профессор кафедры «Энергообеспечение и теплотехника» Иркутского государственного аграрного университета имени А. А. Ежевского.

И. Ж. Дугаржапова – студентка института «Архитектура, строительство и дизайн» Иркутского национального исследовательского технического университета.

А. А. Батурин – аспирант кафедры «Городское строительство и хозяйство» Иркутского национального исследовательского технического университета.

В. Д. Очиров – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Энергообеспечение и теплотехника» Иркутского государственного аграрного университета имени А. А. Ежевского.

Information about the authors

I. Yu. Shelekhov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Urban Construction and Economy, Irkutsk National Research Technical University.

I. V. Altukhov – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Energy Supply and Heat Engineering, Irkutsk State Agrarian University named after A. A. Ezhevsky.

I. Zh. Dugarzhapova – Student of the Institute of Architecture, Construction and Design, Irkutsk National Research Technical University.

A. A. Baturin – Postgraduate Student of the Department of Urban Construction and Economy, Irkutsk National Research Technical University.

V. D. Ochirov – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Energy Supply and Heat Engineering, Irkutsk State Agrarian University named after A. A. Ezhevsky.

Статья поступила в редакцию 13.05.2025; одобрена после рецензирования 10.07.2025; принята к публикации 28.08.2025.

The article was submitted 13.05.2025; approved after reviewing 10.07.2025; accepted for publication 28.08.2025.

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 (границы 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 представляются 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 22.09.2025. Дата выхода в свет 23.09.2025

Тираж 350 экз. Формат 60×84/8
Объем 13,1 уч.-изд. л., 14,25 усл.-печ. л. Заказ № 4040

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. № 3 (75), 1–114