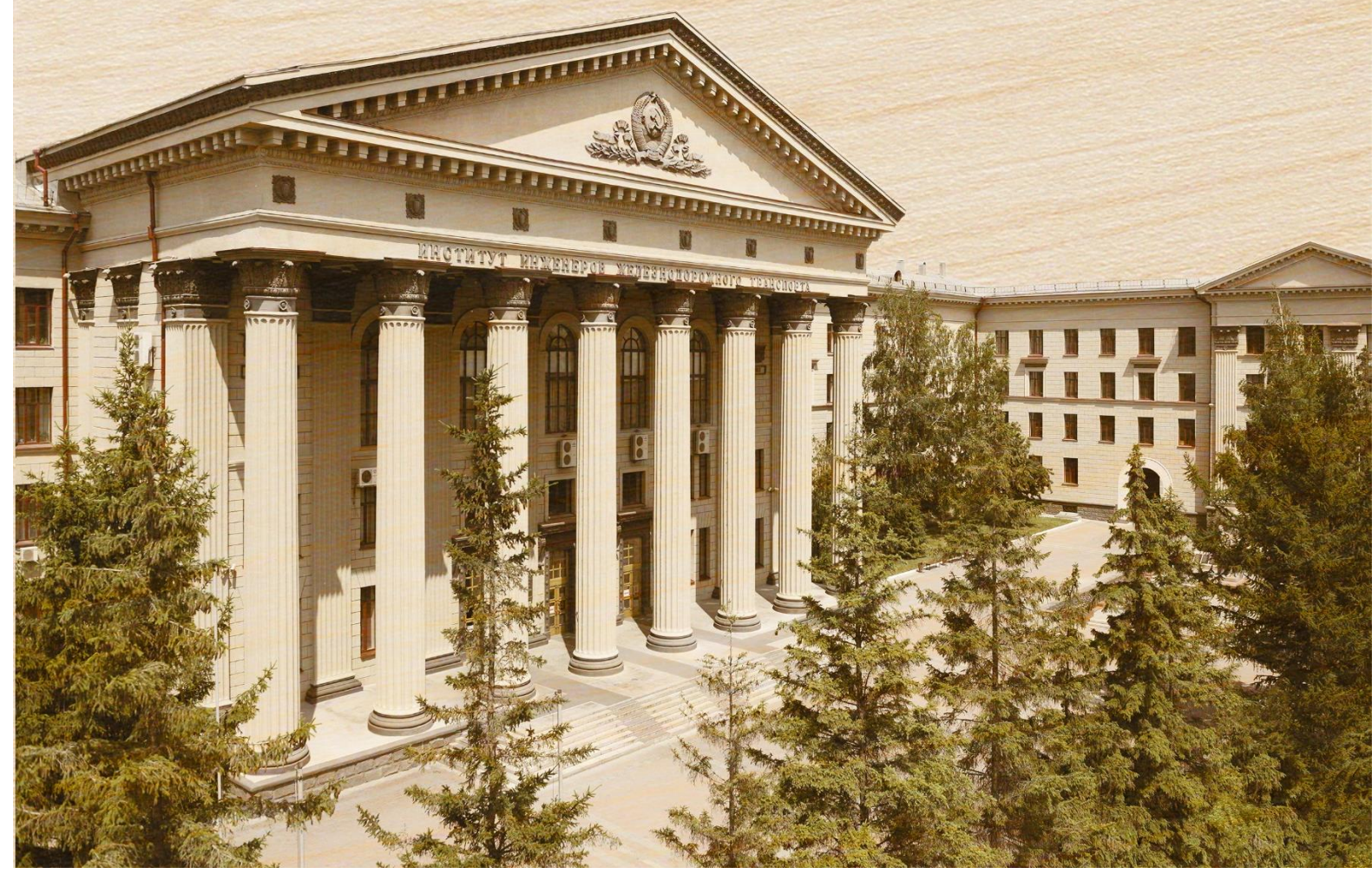


ISSN 1815-9265

ВЕСТНИК

Сибирского государственного
университета путей сообщения

№ 1 (78). 2026 16+



УЧРЕДИТЕЛЬ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»

Состав редколлегии

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Заместитель главного редактора

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

Ответственный секретарь

Галай Марина Сергеевна – канд. техн. наук

Члены редколлегии:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редактор перевода текста на английский язык

Степачкова Ирина Игоревна – старший преподаватель

Редактор *Е. Е. Рыжкова*

Корректор *А. А. Игумнов* – канд. техн. наук

Макет, верстка *Ю. В. Борцовой*

Дизайн обложки *А. С. Петренко*

Сайт журнала:

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

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

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

FOUNDER

The Siberian Transport University

Editors and Editorial Board

Editor-in-Chief

A. L. Manakov, Doctor of Engineering, Professor

Deputy Editor

A. D. Abramov, Doctor of Engineering, Professor

Deputy Editor

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

Executive Secretary

M. S. Galay, Candidate of Engineering

Editors

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

English Text Reviewer

I. I. Stepachkova, Senior Lecturer

Text Reviewer **E. E. Ryzhkova**

Managing Editor **A. A. Igumnov**, Candidate of Engineering

Layout Designer **Yu. V. Bortsova**

Cover Designer **A. S. Petrenko**

Main contact details

Siberian Transport University

room 307, 191, Dusi Kovalchuk St.

630049, Novosibirsk, Russia

Phone: (383) 328-04-36

Web: <http://www.stu.ru> (Scientific Activity section)

E-mail: vestniksgups@sibgups.ru

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

ISSN: 1815-9265

Включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, по научным специальностям 2.9 «Транспорт» и 2.1 «Строительство и архитектура»

№ 1 (78) • 2026 • ЯНВАРЬ – МАРТ • 16+

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

СОДЕРЖАНИЕ

Транспорт

<i>Величко Д. В., Севостьянов А. А., Воробьев В. С. Оценка сроков службы и динамики отказов крестовин стрелочных переводов на Транссибирской магистрали</i>	<i>5</i>
<i>Селюнин И. А., Павлова В. Л. Влияние шума от железнодорожного транспорта на объекты городской инфраструктуры.....</i>	<i>13</i>
<i>Меркурьев Ю. С., Колос А. Ф. Демпфирование сейсмического воздействия в модели упругоупрочняющегося грунта с жесткостью при малых деформациях на примере железнодорожной насыпи</i>	<i>24</i>
<i>Воробьев В. С., Мызникова В. Н. Оценка развития и формирования экспортно ориентированного транспортного коридора Россия – Монголия – Китай.....</i>	<i>38</i>
<i>Ольховиков С. Э., Петренева Е. А. Транспортные решения для грузовладельцев по перевозке котельного оборудования в северном направлении</i>	<i>47</i>
<i>Разуваев Д. А., Нагаев Е. И. Влияние коэффициента теплообмена охлаждающих устройств на термостабилизацию основания земляного полотна транспортных сооружений.....</i>	<i>56</i>
<i>Безусов Д. С., Числов О. Н., Колошин С. А. О методах оценки эффективности организационных структур управления железнодорожным транспортным производством</i>	<i>66</i>
<i>Игумнов А. А., Игумнова Т. В. Разработка способов измерения динамических сил в системе «колесо – рельс» с использованием модельного эксперимента и тензометрии.....</i>	<i>78</i>

Строительство и архитектура

<i>Кузнецов А. О. Определение усилий обделок транспортных тоннелей на заданные нагрузки по гипотезе общих деформаций методами численного моделирования</i>	<i>89</i>
<i>Цибариус Ю. А., Игнатов Н. Д., Ардышев И. К. Влияние дисперсного армирования на стойкость асфальтобетонов к пластическому колееобразованию.....</i>	<i>97</i>
<i>Караулов А. М., Королев К. В., Федосин К. А., Королева В. С. Оценка надежности фундамента по осадке многослойного основания.....</i>	<i>103</i>
<i>Воронцов Д. С., Сырямин П. Ю., Сырямин Ю. Н. К выбору параметров податчика для эффективной работы ударной машины при нагельном креплении грунтовых откосов</i>	<i>109</i>

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"

№ 1 (78) · 2026 · January – March · 16+

Issued quarterly. Established in 1999

CONTENTS

Transport

- D. V. Velichko, A. A. Sevostyanov, V. S. Vorobyev.* Evaluation of the service life and failure dynamics of crosspieces on the Trans-Siberian Railway5
- I. A. Selyunin, V. L. Pavlova.* The impact of railway noise on urban infrastructure13
- Yu. S. Merkuryev, A. F. Kolos.* Damping of seismic impact in the hardening soil small model in case of railway subgrade24
- V. S. Vorobyev, V. N. Myznikova.* Assessment of development and formation of export-oriented transport corridor Russia – Mongolia – China38
- S. E. Olkhovikov, E. A. Petrenea.* Transport solutions for cargo owners to transport boiler equipment in the northern direction47
- D. A. Razuvaev, E. I. Nagaev.* Influence of the heat transfer coefficient of cooling devices on the thermal stabilization of railway subgrade foundations56
- D. S. Bezusov, O. N Chislov, S. A. Koloshin.* On methods for assessing the effectiveness of organizational structures for managing railway transport production66
- A. A. Igumnov, T. V. Igumnova.* Development methods for measuring dynamic forces in the wheel-rail system using a model experiment and strain-gauging78

Building and Architecture

- A. O. Kuznetsov.* Determining the forces in the lining of transport tunnel for given loads under the general deformation hypothesis using numerical modeling methods89
- Yu. A. Tsibarius, N. D. Ignatov, I. K. Ardyshev.* The influence of dispersed reinforcement on the resistance of asphalt concrete to plastic rutting97
- A. M. Karaulov, K. V. Korolev, K. A. Fedosin, V. S. Koroleva.* Evaluation of foundation reliability based on the settlement of a multi-layer base103
- D. S. Vorontsov, P. Yu. Syryamin, Yu. N. Syryamin.* To the selection of feeder parameters for efficient operation of the impact machine when doweling soil slopes109

TRANSPORT

Научная статья

УДК 625.14

doi:10.52170/1815-9265_2026_78_5

Оценка сроков службы и динамики отказов крестовин стрелочных переводов на Транссибирской магистрали

Дмитрий Валерьевич Величко^{1✉}, Александр Александрович Севостьянов²,
Валерий Степанович Воробьев³

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

¹ vdv.nsk@mail.ru✉

² seva2233@yandex.ru

³ vorobjev@stu.ru

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы оценки фактических сроков службы и динамики отказов крестовин стрелочных переводов в суровых эксплуатационных условиях Транссибирской магистрали. Выполнен обзор эксплуатируемых на Транссибирской магистрали (ЗСДИ) различных марок и проектов стрелочных переводов, отдельно по I и II путям. Определено, что 99...100 % марок – 1/11, а также что 74...78 % проектов – 2750 и 13...17 % – 2768.

Выполнена оценка отказов крестовин стрелочных переводов в особо грузонапряженных условиях по I и II путям Транссибирской магистрали. Анализ проводился на основе отчетных материалов за последние 5 лет (с 2020 по 2024 г.) трех дистанций пути (ПЧ К, ПЧ Т, ПЧ Б), расположенных по направлению Омск – Новосибирск.

Выполнена оценка динамики отказов современных новых крестовин (марки 1/11, проектов 2750 и 2768) при их первом сроке службы и старогодных крестовин при их втором сроке службы. В результате проведен сравнительный анализ величины первого и второго сроков службы новых и старогодных крестовин по отказам трех групп крестовин: современные новые (текущего цикла); новые (предыдущего цикла); старогодные (предыдущего цикла, переложенные). Так, например, средняя наработка до отказа крестовин проекта 2750 по I и II путям для современных новых (текущего цикла) крестовин – 133...138 млн т, что на 9 % больше, чем для новых (предыдущего цикла) крестовин – 122...126 млн т.

Проведен сравнительный анализ нормативного и фактического уровней срока службы крестовин стрелочных переводов для суровых эксплуатационных условий Транссибирской магистрали.

Ключевые слова: железнодорожный путь, стрелочный перевод, крестовина, отказ, срок службы, пропущенный тоннаж

Для цитирования: Величко Д. В., Севостьянов А. А., Воробьев В. С. Оценка сроков службы и динамики отказов крестовин стрелочных переводов на Транссибирской магистрали // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 1 (78). С. 5–12. DOI 10.52170/1815-9265_2026_78_5.

TRANSPORT

Original article

Evaluation of the service life and failure dynamics of crosspieces on the Trans-Siberian Railway

Dmitry V. Velichko^{1✉}, Alexander A. Sevostyanov², Valery S. Vorobyev³

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

¹ vdv.nsk@mail.ru✉

² seva2233@yandex.ru

³ vorobjev@stu.ru

Abstract. The article discusses the assessment of the actual service life and failure dynamics of crosspieces in the harsh operating conditions of the Trans-Siberian Railway. The article provides an overview of the various brands and designs of crosspieces used on the Trans-Siberian Railway (ZSDI), separately for tracks I and II. It is determined that 99...100 % of the brands – 1/11, and that 74...78 % of the projects – 2750 and 13...17 % – 2768.

The article assesses the failures of crosspieces of switch-gates (SP) in particularly heavy-duty conditions on the I and II tracks of the Trans-Siberian Railway. The analysis was conducted based on the reporting materials for the last 5 years (2020–2024) of three track sections located in the direction of Omsk – Novosibirsk.

The dynamics of failures of modern new crosspieces (mark 1/11, projects 2750 and 2768) during their first service life and old crosspieces during their second service life were evaluated. As a result, a comparative analysis of the first and second service lives of new and used crosspieces was conducted based on failures of three groups of crosspieces: modern new (current cycle); new (previous cycle); used (previous cycle, re-laid). For example, the average time before failure of Project 2750 crosspieces on tracks I and II for modern new (current cycle) crosspieces is 133...138 million tons, which is 9% higher than for new (previous cycle) crosspieces – 122...126 million tons.

A comparative analysis of the normative and actual service life levels of crosspieces for the harsh operating conditions of the Trans-Siberian Railway has been carried out.

Keywords: Railway track, switchboard, crosspiece, failure, service life, missed tonnage

For citation: Velichko D. V., Sevostyanov A. A., Vorobyev V. S. Evaluation of the service life and failure dynamics of crosspieces on the Trans-Siberian Railway. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(78):5–12. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_78_5.

Введение

Стрелочные переводы (СП), в виду конструкционных и эксплуатационных особенностей, испытывают на себе повышенное динамическое воздействие от подвижного состава [1–3]. При этом они состоят из трех основных частей (стрелки, соединительных путей и крестовины), обладающих различными прочностными параметрами, в связи с чем все три указанные части имеют различные уровни нормативного срока службы. Например, нормативный срок службы стрелки – 275 млн т, соединительных путей – 700 млн т, крестовины – 80 млн т.

В соответствии с указанием [4] установлены нормативные сроки службы крестовин обыкновенных стрелочных переводов. Нормативный срок службы крестовин с литым сердечником из высокомарганцевистой стали – 80 млн т, упрочненных – 90 млн т, а гарантийный срок – 60 млн т бр. [5].

В соответствии с Правилами [6] для назначения капитального ремонта стрелочного перевода с железобетонными брусьями $K_{СП}$ основным критерием является нормативный уровень пропущенного тоннажа, который для новых крестовин на главных путях (1...4-го класса) – 350 млн т, для старогодных крестовин (4-го класса) – 200 млн т (табл. 1).

При этом нормативный срок службы всего стрелочного перевода на железобетонных брусьях (на путях специализаций О, Г(И))

устанавливается заводом-изготовителем, но не должен быть менее 700 млн т / 30 лет [6].

В силу особой значимости задач по дальнейшему увеличению срока службы всего железнодорожного пути [7], актуальными являются вопросы по оценке соотношения нормативного и фактического сроков службы элементов СП [8–11], в том числе в суровых эксплуатационных условиях Транссибирской магистрали.

Материалы и методы исследования

Выполнена оценка отказов крестовин СП в особо грузонапряженных условиях по I и II путям Транссибирской магистрали. Анализ проводился на основе отчетных материалов за последние 5 лет (с 2020 по 2024 г.) трех дистанций пути (ПЧ К, ПЧ Т, ПЧ Б), расположенных по направлению Омск – Новосибирск.

Указанное направление Транссибирской магистрали характеризуется особо грузонапряженной эксплуатационной работой по обоим направлениям движения и высокой скоростью движения поездов, в связи с чем вопросы оценки сроков службы крестовин стрелочных переводов в этих условиях представляют существенный интерес.

I и II главные пути Транссибирской магистрали относятся к 1 классу, код группы специализации ОИП. Эксплуатационная характеристика: грузонапряженность по I пути – 100...103,2 млн т-км бр. / км в год; по II пути –

Таблица 1

Основной критерий выбора ремонта стрелочных переводов $K_{СП}$

Класс пути	Нормативный срок службы в зависимости от основания и степени годности металлических частей СП с железобетонными брусьями, млн т (годы)	
	Новые	Старогодные
1...3	350 (30)	–
4	350 (35)	200 (35)
5	По фактическому состоянию	

85,6...87,9 млн т-км бр. / км в год. Серии ведущих локомотивов: грузовых – ВЛ10 и 2ЭС6, пассажирских – ЭП2К. Максимальная скорость движения пассажирских поездов – 100...120 км/ч, грузовых – 80...90 км/ч.

Характеристики стрелочных переводов по главным путям Транссибирской магистрали (Транссиб), на примере ПЧ К, ПЧ Т, ПЧ Б на 01.01.2025, приведены в табл. 2, 3.

Самой распространенной маркой стрелочных переводов является марка 1/11 – 99...100 %. Наиболее распространенными проектами СП являются 2750 – 74...78 % и 2768 – 13...17 %, соответственно, отказы крестовин именно этих двух проектов СП подробно рассматривались в работе.

Оба проекта стрелочных переводов марки 1/11 (2750 и 2768) применяются на главных путях железнодорожных линий со смешанным грузопассажирским движением поездов и скоростями движения пассажирских поездов по прямому пути до 140 км/ч. Особенности конструкции крестовин: у проекта 2750 – сборная, с рельсовыми усовиками и литым сердечником из высокомарганцовистой стали, с приварными рельсовыми окончаниями;

у проекта 2768 – сборная, с рельсовыми усовиками и литым сердечником из высокомарганцовистой стали, с вкладышно-накладочным окончанием заднего вылета.

При обработке материалов об отказах крестовин стрелочных переводов использовались статистические методы с группировкой данных по одинаковым промежуткам наработанного пропущенного тоннажа, с расчетом значений и долей в каждом из интервалов в среднем за 5 лет и с оценкой среднего срока службы, при этом в работе отдельно рассматривались отказы крестовин при их первом и втором сроке службы.

Результаты исследования

Динамика отказов современных новых крестовин (проектов 2750 и 2768) по I и II путям Транссибирской магистрали с 2020 по 2024 г. приведена и на рис. 1.

Динамика отказов старогодных (переложенных) крестовин по I и II путям Транссибирской магистрали с 2020 по 2024 г. отражена на рис. 2.

Далее выполнен сравнительный анализ новых и старогодных крестовин при их первом и втором сроках службы.

Таблица 2

Характеристика стрелочных переводов Транссиба (по маркам)

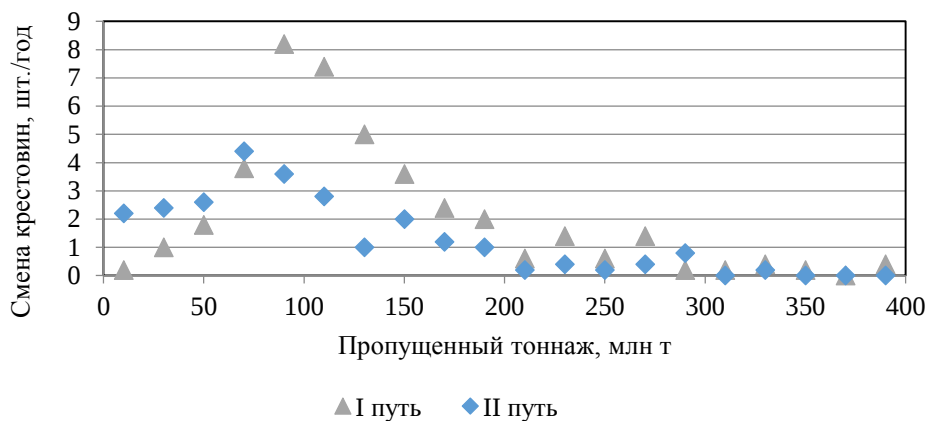
Марка СП	Количество замен, шт.				Доля, %
	ПЧ К	ПЧ Т	ПЧ Б	Всего	
I главный путь					
1/11	38	46	63	147	99,3
1/18	–	–	1	1	0,7
II главный путь					
1/11	36	48	43	127	100

Таблица 3

Характеристика стрелочных переводов Транссиба (по проектам)

Проект СП	Количество замен крестовин, шт.				Доля, %
	ПЧ К	ПЧ Т	ПЧ Б	Всего	
I главный путь					
2750	36	33	46	115	77,7
2768	—	6	14	20	13,5
2799	2	7	3	12	8,1
2870	—	—	1	1	0,7
Итого	38	46	64	148	100
II главный путь					
2750	34	35	25	94	74,0
2768	-	6	15	21	16,5
2799	2	7	3	12	9,5
Итого	36	48	43	127	100

а)



б)

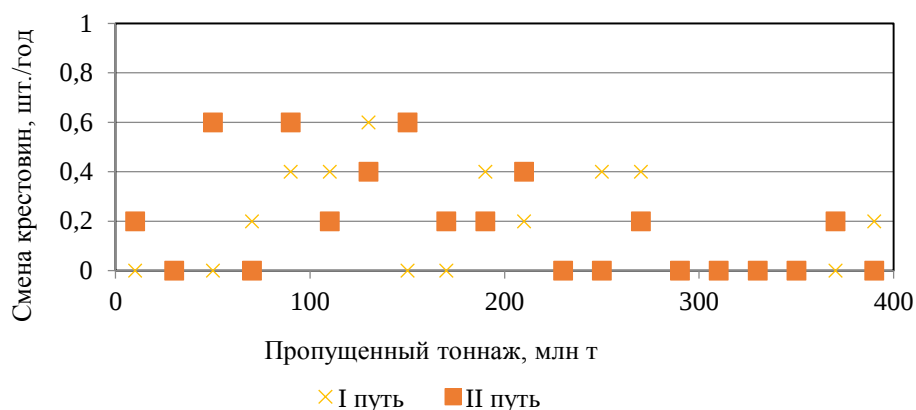


Рис. 1. Динамика отказов новых крестовин проектов 2750 (а) и 2768 (б) по I и II путям Транссиба

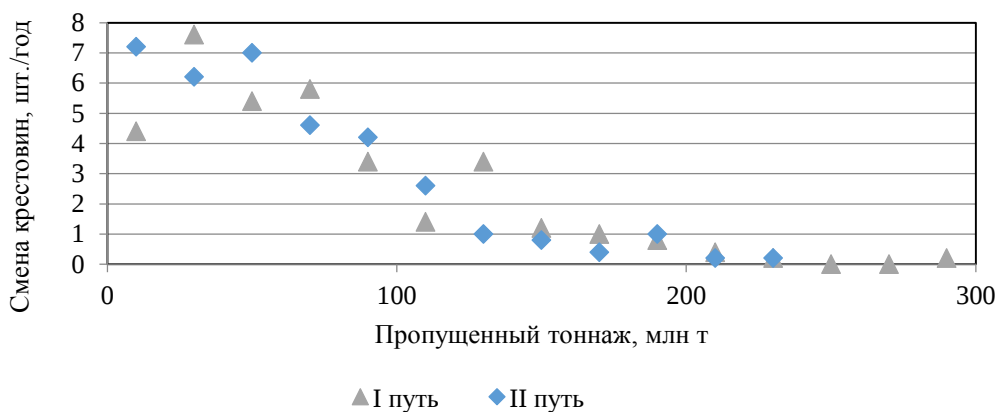


Рис. 2. Динамика отказов старогодных крестовин проекта 2750 (2-й срок службы) по I и II путям Транссиба

Отдельно рассматриваются три группы отказов крестовин:

- современные новые (текущего цикла) крестовины;
- новые (предыдущего цикла) крестовины;
- старогодные (предыдущего цикла) крестовины (переложенные).

Средний тоннаж наработки новых (текущего и предыдущего циклов) и старогодных крестовин до отказа приведен на рис. 3, 4.

Средняя наработка до отказа новых (текущего и предыдущего цикла) крестовин проекта 2750:

- по I пути для современных новых (текущего цикла) крестовин – 133 млн т, что на 9 %

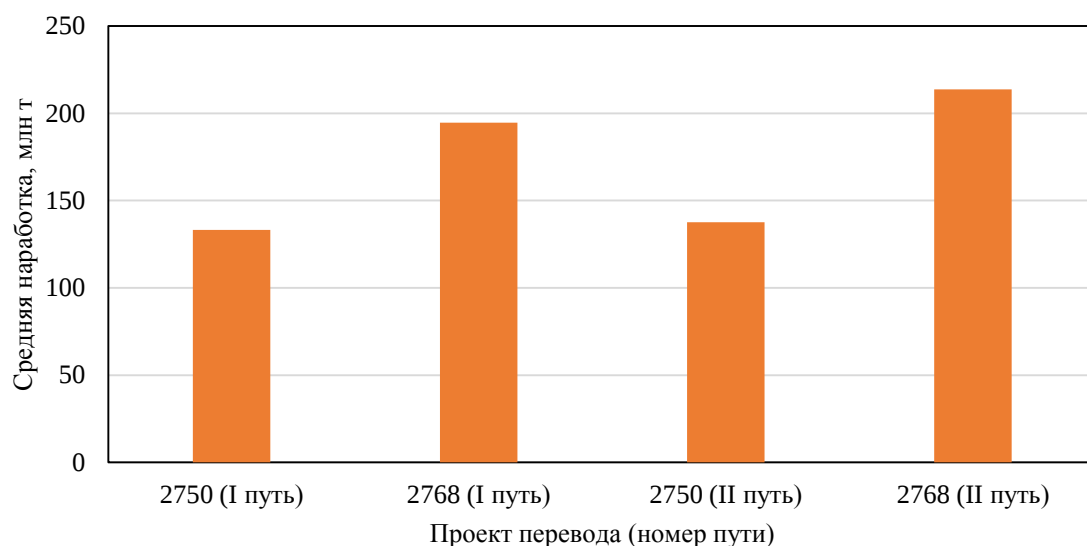


Рис. 3. Средняя наработка тоннажа до замены современных новых (текущего цикла) крестовин на Транссибирской магистрали

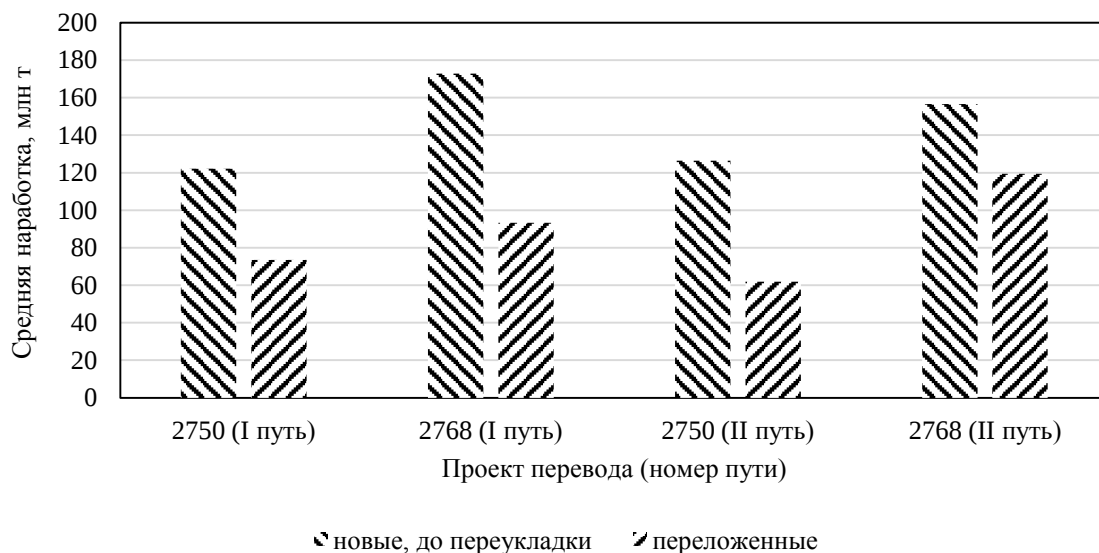


Рис. 4. Средняя наработка тоннажа до замены новых (предыдущего цикла) и старогодных (предыдущего цикла) крестовин

больше, чем для новых (предыдущего цикла) крестовин – 122 млн т;

– по II пути для современных новых (текущего цикла) крестовин – 138 млн т, что на 9 % больше, чем для новых (предыдущего цикла) крестовин – 126 млн т.

Средняя наработка до отказа новых (текущего и предыдущего цикла) крестовин проекта 2768:

– по I пути для современных новых (текущего цикла) крестовин – 195 млн т, что на 13 % больше, чем для новых (предыдущего цикла) крестовин – 173 млн т;

– по II пути для современных новых (текущего цикла) крестовин – 214 млн т, что на 36 % больше, чем для новых (предыдущего цикла) крестовин – 157 млн т.

При этом средняя наработка до отказа новых (предыдущего цикла) и старогодных (предыдущего цикла) крестовин проекта 2750:

– по I пути для новых (предыдущего цикла) крестовин – 122 млн т, что на 65 % больше, чем для старогодных (предыдущего цикла) крестовин – 74 млн т;

– по II пути для новых (предыдущего цикла) крестовин – 126 млн т, что на 103 %

больше, чем для старогодных (предыдущего цикла) крестовин – 62 млн т.

Средняя наработка до отказа новых (предыдущего цикла) и старогодных (предыдущего цикла) крестовин проекта 2768:

– по I пути для новых (предыдущего цикла) крестовин – 173 млн т, что на 86 % больше, чем для старогодных (предыдущего цикла) крестовин – 93 млн т;

– по II пути для новых (предыдущего цикла) крестовин – 157 млн т, что на 32 % больше, чем для старогодных (предыдущего цикла) крестовин – 119 млн т.

Выводы

На основании проведенного исследования можно заключить следующее:

1. Выполнен обзор современного состояния стрелочного хозяйства при эксплуатации в сложных условиях Транссибирской магистрали (ЗСДИ). Определены актуальные технические параметры различных марок и проектов стрелочных переводов, отдельно по I и II путям: самой распространенной маркой СП является марка 1/11 – 99...100 %. Наиболее распространенными проектами СП являются проект 2750 – 74...78 % и проект 2768 – 13...17 %.

2. Выполнена оценка отказов крестовин СП (марки 1/11, проектов 2750 и 2768) в особо грузонапряженных условиях по I и II путям Транссибирской магистрали. Анализ проводился на основе отчетных материалов за последние 5 лет (с 2020 по 2024 г.) трех дистанций пути (ПЧ К, ПЧ Т, ПЧ Б), расположенных по направлению Омск – Новосибирск.

Проведен сравнительный анализ величины первых сроков службы новых крестовин по отказам двум групп: современные новые (текущего цикла) крестовины; новые (предыдущего цикла) крестовины.

Средняя наработка до отказа новых (текущего и предыдущего цикла) крестовин проекта 2750: по I пути для современных новых (текущего цикла) крестовин – 133 млн т, что на 9 % больше, чем для новых (предыдущего цикла) крестовин – 122 млн т; по II пути для современных новых (текущего цикла) крестовин – 138 млн т, что на 9 % больше, чем для новых (предыдущего цикла) крестовин – 126 млн т.

Средняя наработка до отказа новых (текущего и предыдущего цикла) крестовин проекта 2768: по I пути для современных новых

(текущего цикла) крестовин – 195 млн т, что на 13 % больше, чем для новых (предыдущего цикла) крестовин – 173 млн т; по II пути для современных новых (текущего цикла) крестовин – 214 млн т, что на 36 % больше, чем для новых (предыдущего цикла) крестовин – 157 млн т.

3. Сравнение проектов 2750 и 2768 показало, что средние наработки до отказа современных новых (текущего цикла): по I пути для проекта 2750 – 133 млн т, что в 1,4 раза меньше, чем для проекта 2768 – 195 млн т; по II пути для проекта 2750 – 138 млн т, что в 1,5 раза меньше, чем для проекта 2768 – 214 млн т.

Также определено, что средние наработки до отказа новых (предыдущего цикла) крестовин: по I пути для проекта 2750 – 122 млн т, что в 1,4 раза меньше, чем для проекта 2768 – 173 млн т; по II пути для проекта 2750 – 173 млн т, что в 1,1 раза больше, чем для проекта 2768 – 157 млн т.

4. Выполнена оценка динамики отказов крестовин (марки 1/11, проектов 2750 и 2768) при их первом сроке службы и старогодных крестовин при их втором сроке службы: новые (предыдущего цикла) крестовины; старогодные (предыдущего цикла) крестовины.

Средняя наработка до отказа новых (предыдущего цикла) и старогодных (предыдущего цикла) крестовин проекта 2750: по I пути для новых (предыдущего цикла) крестовин – 122 млн т, что на 65 % больше, чем для старогодных (предыдущего цикла) крестовин – 74 млн т; по II пути для новых (предыдущего цикла) крестовин – 126 млн т, что на 103 % больше, чем для старогодных (предыдущего цикла) крестовин – 62 млн т.

Средняя наработка до отказа новых (предыдущего цикла) и старогодных (предыдущего цикла) крестовин проекта 2768: по I пути для новых (предыдущего цикла) крестовин – 173 млн т, что на 86 % больше, чем для старогодных (предыдущего цикла) крестовин – 93 млн т; по II пути для новых (предыдущего цикла) крестовин – 157 млн т, что на 32 % больше, чем для старогодных (предыдущего цикла) крестовин – 119 млн т.

5. Проведен сравнительный анализ нормативного и фактического уровней срока службы крестовин стрелочных переводов в суровых эксплуатационных условиях Транссибирской

магистральной. Средний срок службы новых крестовин для самого распространенного проекта СП 2750 составляет в среднем по I пути – 122...133 млн т, по II пути – 126...138 млн т, что

в особо грузонапряженных условиях Транссибирской магистрали соответствует 1...1,5 годам службы, т. е. в 1,5...1,7 раза больше нормативных сроков службы крестовин – 80 млн т.

Список источников

1. Глюзберг Б. Э., Калачев А. М., Королев В. В. Повышение эксплуатационных качеств крестовин стрелочных переводов за счет изменения их геометрии в контакте «колесо-рельс» // Наука и техника транспорта. 2004. № 1. С. 70–81.
2. Карпущенко Н. И., Величко Д. В. Обеспечение надежности железнодорожного пути и безопасности движения поездов : монография. Новосибирск : Изд-во Сиб. гос. ун-та путей сообщения, 2008. 321 с.
3. Карпущенко Н. И., Комардинкин Р. А. Обеспечение безопасности при проезде поездов по стрелочным переводам на особогрузонапряженных участках // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 3. С. 31–39.
4. О введении нормативных сроков службы стрелочных переводов : указание Министерства путей сообщения Российской Федерации от 19.12.2002 № С-1241у. Москва, 2002. 6 с.
5. ГОСТ 7370–2015. Крестовины железнодорожные. Технические условия : приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 сентября 2015 г. № 1399-ст : введ. в действие 2016-07-01. Москва : Стандартинформ, 2015. 61 с.
6. Правила назначения ремонтов железнодорожного пути : распоряжение ОАО «РЖД» от 17.12.2021 № 2888р. Москва, 2021. 270 с.
7. Карпущенко Н. И., Комардинкин Р. А. Параметры жизненного цикла стрелочных переводов проекта 2750 на железобетонных брусках // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2020. № 4. С. 239–248.
8. Сосков А. Г. Эксплуатация крестовин в условиях тяжеловесного движения на Западно-Сибирской дороге // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 10. С. 2–4.
9. Вихт Н. С., Юдин О. Г., Величко Д. В. Современное состояние стрелочного хозяйства при эксплуатации в особогрузонапряженных условиях // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2024. № 2. С. 25–35.
10. Карпущенко Н. И., Комардинкин Р. А. Оценка долговечности стрелочных переводов на железобетонных брусках // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2020. № 2. С. 12–20.
11. Трегубчак П. В. Разработка крестовин стрелочных переводов для условий тяжеловесного и интенсивного движения : специальность 2.9.2 «Железнодорожный путь, изыскания и проектирование железных дорог» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Трегубчак Павел Владимирович. Москва, 2024. 150 с.

References

1. Glyuzberg B. E., Kalachev A. M., Korolev V. V. Improving the performance of crosspieces by changing their geometry in the wheel-rail Contact. *Science and Technology of Transport*. 2004;(1):70–81. (In Russ.).
2. Karpushchenko N. I., Velichko D. V. Ensuring track reliability and train traffic safety. Monograph. Novosibirsk: Publishing House of Siberian Transport University; 2008. 321 p. (In Russ.).
3. Karpushchenko N. I., Komardinkin R. A. Ensuring safety during train passage through turnouts on high-volume sections. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(62):31–39. (In Russ.).
4. On the Introduction of Standard Service Lifespans for Turnouts. Instruction of the Ministry of Railways of the Russian Federation dated 19.12.2002 No. S-1241u. Moscow; 2002. 6 p. (In Russ.).
5. GOST 7370–2015. Railway Crossings. Specifications. The Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated 29.09.2015 No. 1399-st, entered into force on 07.01.2016. Moscow: Standartinform; 2015. 61 p. (In Russ.).
6. Rules for Appointing Railway Track Repairs. Order of Russian Railways dated 17.12.2021 No. 2888r. Moscow; 2021. 270 p. (In Russ.).
7. Karpushchenko N. I., Komardinkin R. A. Life cycle parameters of project 2750 turnouts on reinforced concrete beams. *Modern Technologies. Systems Analysis. Modeling*. 2020;(4):239–248. (In Russ.).
8. Soskov A. G. Operation of frogs under heavy-haul traffic conditions on the West Siberian railway. *Track and Track Facilities*. 2021;(10):2–4. (In Russ.).
9. Vikht N. S., Yudin O. G., Velichko D. V. Current state of turnout facilities during operation under high-tensile conditions. *Fundamental and Applied Issues of Transport*. 2024;(2):25–35. (In Russ.).
10. Karpushchenko N. I., Komardinkin R. A. Durability assessment of turnouts on reinforced concrete beams. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2020;(53):12–20. (In Russ.).
11. Tregubchak P. V. Development of turnout frogs for heavy-haul and intensive traffic conditions. Specialty 2.9.2 ‘Railway track, survey and design of railways’. Dissertation for the Degree of Candidate of Engineering. Tregubchak Pavel Vladimirovich. Moscow; 2024. 150 p. (In Russ.).

Информация об авторах

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

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

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

Information about the authors

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

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

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

Статья поступила в редакцию 11.09.2025; одобрена после рецензирования 14.10.2025; принята к публикации 16.01.2026.

The article was submitted 11.09.2025; approved after reviewing 14.10.2025; accepted for publication 16.01.2026.

Научная статья
УДК 628.517
doi:10.52170/1815-9265_2026_78_13

Влияние шума от железнодорожного транспорта на объекты городской инфраструктуры

Илья Андреевич Селюнин^{1✉}, Вера Львовна Павлова²

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

¹ ilya.selyunin.96@mail.ru

² p_v_75@mail.ru

Аннотация. Железнодорожный транспорт наиболее доступен и эффективен для перевозки массовых грузов и пассажиров по соотношению цена – качество, но при этом имеет определенные недостатки. Разветвленная сеть примыканий, остановочных пунктов в селитебной зоне густонаселенных городов и промышленных центров – местах вагонообразования грузовых и пассажирских составов – негативно сказывается на здоровье населения. Эксплуатация подвижного состава и другие транспортные процессы приводят к наличию значительного количества звуковых волн различных частот, оказывающих негативное влияние на организм человека, в пределах массового скопления и круглосуточного проживания людей. Жалобы на повышенный шум в крупных городах, например в «Роспотребнадзор», составляют около 65 % от общего числа жалоб на неблагоприятные условия проживания в селитебной зоне. При этом вклад транспортного комплекса в шум городского хозяйства – 55 % от общей доли шумового загрязнения. Ежегодно наблюдается рост населения, входящего в зону «акустического дискомфорта», на текущий момент его доля составляет 55–70 % населения развитых и развивающихся стран.

На полигоне Западно-Сибирской железной дороги организованы поиск, измерение и последующая оценка уровня шума, комплексный анализ объектов транспортной инфраструктуры с целью выявления зон сверхнормативного шума, оказывающих негативное влияние на человека в пределах селитебной зоны, расположенных в непосредственной близости от железнодорожной инфраструктуры пассажирского, пригородного и грузового движения.

Поскольку Западно-Сибирская железная дорога имеет значительную площадь, высокую интенсивность движения грузовых и пассажирских поездов, железнодорожные пути находятся в непосредственной близости к жилым или общественным зданиям, в которых люди проводят достаточно много времени, включая ночное, есть дополнительные источники шума в виде автомагистралей. Результаты измерений, их обработка и отправные рекомендации по формированию систем защиты от шума представлены в данной статье.

Ключевые слова: акустическое загрязнение, шум, селитебная территория, затухание шума, системы защиты от шума

Для цитирования: Селюнин И. А., Павлова В. Л. Влияние шума от железнодорожного транспорта на объекты городской инфраструктуры // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 1 (78). С. 13–23. DOI 10.52170/1815-9265_2026_78_13.

Original article

The impact of railway noise on urban infrastructure

Ilya A. Selyunin^{1✉}, Vera L. Pavlova²

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

¹ ilya.selyunin.96@mail.ru

² p_v_75@mail.ru

Abstract. Rail transport is the most accessible and efficient for transporting bulk cargo and passengers in terms of price-quality ratio, but it also has certain disadvantages. An extensive network of junctions and stopping points in the residential zones of densely populated cities and industrial centers - places where freight and passenger trains are formed - negatively affects the health of the population. The operation of rolling stock and other transport processes lead to the presence of a significant number of sound waves of various frequencies, which have a negative impact on the human body, within the limits of mass gatherings and round-the-clock residence of people. Complaints about excessive noise in large cities, for example to Rospotrebnadzor, account for about 65% of the total number of complaints about unfavorable living conditions in residential areas. At the same time, the contribution of the transport complex to urban noise is 55% of the total share of noise pollution. Every year there is an increase in the population entering the zone of 'acoustic discomfort'; currently its share is 55–70% of the population of developed and developing countries.

At the test site of the West Siberian Railway, a search, measurement and subsequent assessment of noise levels, a comprehensive analysis of transport infrastructure facilities were organized in order to identify areas of excess noise that have a negative impact on humans within the residential area, located in close proximity to the railway infrastructure of passenger, suburban and freight traffic.

Since the West Siberian Railway has a significant area, high traffic intensity of freight and passenger trains, the railway tracks are located in close proximity to residential or public buildings in which people spend quite a lot of time, including at night, and there are additional sources of noise in the form of highways. The measurement results, their processing and initial recommendations for the formation of noise protection systems are presented in this article.

Keywords: acoustic pollution, noise, residential area, noise attenuation, noise protection systems

For citation: Selyunin I. A., Pavlova V. L., The impact of railway noise on urban infrastructure. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(78):13–23. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_78_13.

Введение

Железнодорожный транспорт включен в логистическую цепочку перемещения грузов и пассажиров как одна из основных транспортных линий. Ветки железнодорожного транспорта, проходя вдоль населенных пунктов, не только делают доступными и удобными услуги перевозок, но и вызывают ряд экологических проблем, к числу которых относят негативное воздействие шума на человека и окружающую среду. Поэтому объекты железнодорожного транспорта в городской среде (и не только) часто являются причиной жалоб населения на возникающий из-за шума дискомфорт, раздражение, недомогание, прерывистый сон и др. По оценкам специалистов, около 10 % населения подвергается этому вредному воздействию. На железнодорожном транспорте основными источниками шума являются движущийся подвижной состав (уровень звукового давления 80–95 дБ), роспуск состава на сортировочных горках (90–100 дБ и выше), аэродинамическое взаимодействие подвижного состава с окружающей средой, звуковые сигналы (100–110 дБ), шум качения (95–100 дБ), структурный шум и др. И конечно, проблема усугубляется круглосуточной работой железнодорожного транспорта [1]. Особое значение шумовое загрязнение имеет для городского населения. Продолжительное воздействие шума вызывает повышенную раздражительность, нарушение сна, влияет на производительность и безопасность труда [2]. Для людей, проживающих на улицах со средним уровнем звука 65–75 дБА (предельно допустимый уровень (ПДУ) составляет 55 дБА), риск сердечно-сосудистых заболеваний увеличивается на 20 %. Повышенный шум снижает продолжительность жизни на несколько (по экспертным оценкам, до 8–10) лет. Лица старшего возраста более чувствительны к источникам шума. Так, в возрасте до 27 лет реагируют на шум 46 % людей, в возрасте 28–37 лет – 57 %, в возрасте 38–57 лет – 62 %, а в возрасте 58 лет

и старше – 72 %. Большинство жалоб на шум поступает от пожилых людей, это связано с возрастом и состоянием центральной нервной системы у этой группы населения [3]. Более выраженные изменения выявлены у лиц, испытывающих шумовое воздействие на рабочем месте и в быту, по сравнению с лицами, живущими и работающими в условиях отсутствия шума [4, 5].

Основной целью исследования является измерение и последующая оценка уровня шума от железнодорожного транспорта на объектах городской инфраструктуры, находящихся в непосредственной близости от железнодорожной ветки. Задачами исследования являются выбор объектов городской инфраструктуры, изучение методики измерения шума, проведение измерений, оценка и обработка полученных результатов.

Западно-Сибирская железная дорога охватывает огромную территорию, со множеством населенных пунктов и крупных городов, протяженность путей составляет более 6 000 км.

Интересными с точки зрения целей исследования являются селитебные территории крупных городов, где наблюдается естественное массовое скопление людей. Проанализировав территорию крупных городов, попадающих в зону охвата Западно-Сибирской железной дороги, авторы пришли к выводу, что наиболее характерными с точки зрения поставленных задач и возможностей исследования являются следующие объекты:

1. Новосибирская область, г. Новосибирск, Центральный район, ул. Советская, 64 (объект 1). В данном 11-этажном здании находятся бизнес-центр, офисные помещения, частные детские школы и фитнес-центр. Стоит отметить, что соседние здания также расположены вдоль железной дороги и имеют следующее назначение: гостиница, здание областного суда и жилой многоквартирный дом (рис. 1, а). Участок железной дороги – главный ход Транссибирской магистрали, перегон

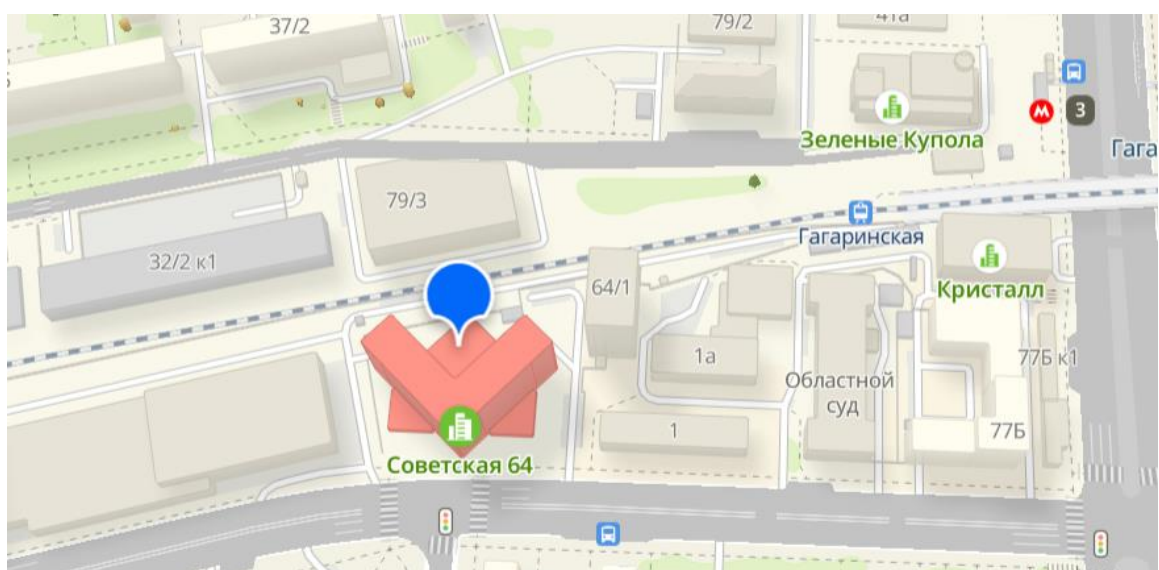
Новосибирск-Главный — остановочная платформа Гагаринская.

Отметим, что на данном участке может осуществляться многократное проведение замеров благодаря высокой пропускной способности участка железной дороги и значительному размеру движения (ориентировочно 80 пар поездов), а также наличию различных видов подвижного состава и номенклатуры грузов.

2. Кемеровская область, г. Новокузнецк, Заводской район, ул. 50 лет ВЛКСМ, 59 (объект 2). Протяженность участка вдоль железной дороги составляет 4 км, вдоль данной улицы проходит

двухпутный участок железной дороги, расположены две железнодорожные станции: остановочная платформа 16 км и станция Островская. В радиусе 100 м от границы станции расположен крупнейший в городе жилмассив Заводского района. Объект характеризуется плотной жилой застройкой, наличием многоэтажных жилых домов (см. рис. 1, б). Стоит отметить, что с данного объекта поступила жалоба в адрес Центра охраны окружающей среды на Западно-Сибирской железной дороге на повышенный шум от работы железнодорожного транспорта, а также на шум от автомобильной дороги.

а)



б)

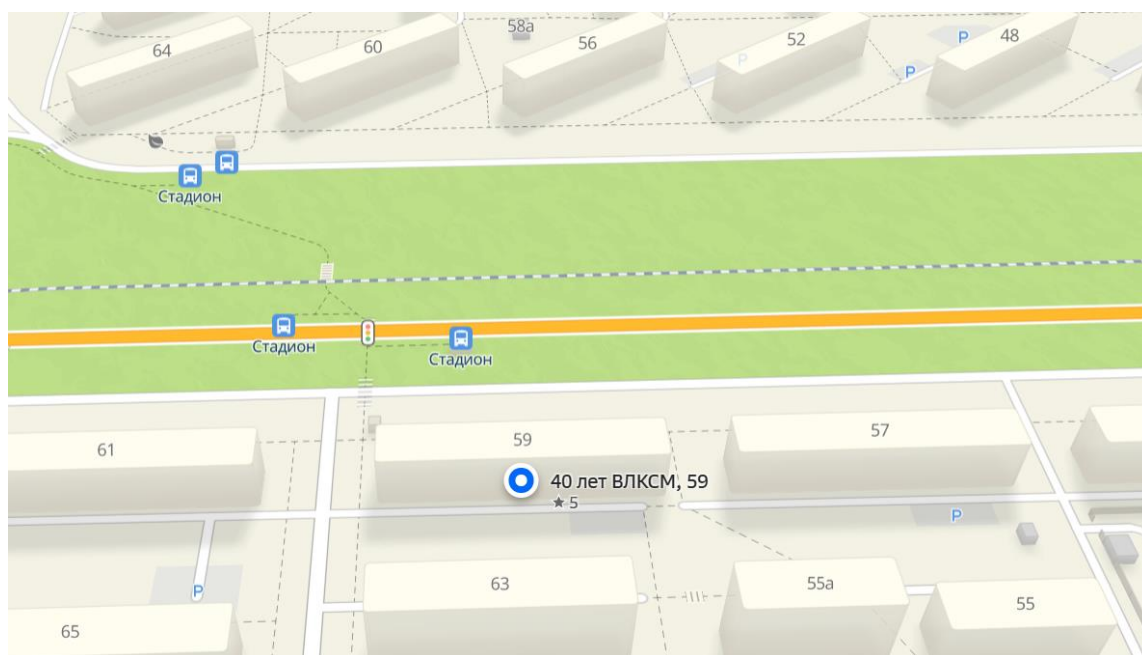


Рис. 1. Расположение объектов 1 (а) и 2 (б) на карте города

Методы исследования

Замеры выполнялись с помощью шумомера – виброметра, анализатора спектра «Экофизика-110А 48906-12», заводской номер ЭФ120744. Данный прибор прошел поверку в ФБУ «Новосибирский ЦСМ», свидетельство о поверке № С-НН/06-03-2025/415071676 от 06.03.2025. Дополнительно использовали стационарный металлический штатив и комплект съемных зарядных устройств.

Замеры осуществлялись в соответствии с требованиями ГОСТ 23337–2014 «Шум. Методы измерения шума на селитебной территории и в помещениях жилых и общественных зданий», определяющего методы измерения в реальных условиях уровней шума от внешних источников на селитебной территории в городах, поселках и других населенных пунктах и уровней шума от внешних и внутренних источников в помещениях жилых и общественных зданий [6]:

- использовался диапазон частот, включающий октавные полосы со среднегеометрическими частотами от 31,5 Гц до 8 кГц;

- в начале каждой серии измерений и после ее окончания проведена акустическая калибровка средств измерения в соответствии с руководствами по их эксплуатации;

- перед проведением измерений шума на открытом воздухе определены метеорологические условия (скорость ветра, температура воздуха, влажность, атмосферное давление), часть – по официальным данным метеослужбы и часть – с помощью соответствующих средств измерений;

- измерения проведены для двух категорий объектов – на территории, непосредственно прилегающей к жилым домам, зданиям больниц, санаториев, поликлиник, амбулаторий, диспансеров, домов отдыха, пансионатов, домов-интернатов для престарелых и инвалидов, детских дошкольных учреждений, школ и других учебных заведений, библиотек, гостиниц и общежитий, а также в помещениях офисов, рабочих помещениях и кабинетах административных зданий, конструкторских, проектных и научно-исследовательских организаций не менее чем в трех точках, расположенных на расстоянии 2 м от ограждающих конструкций зданий на высоте от $(1,2 \pm 0,1)$ м до $(1,5 \pm 0,1)$ м над уровнем поверхности территории;

- измерения проводились в ясную погоду, без выпадения атмосферных осадков, тумана, при температуре и влажности воздуха, соответствующей паспортным данным на аппаратуру, и при скорости ветра не более 5 м/с [7, 8];

- при скорости ветра от 1 до 5 м/с применялось ветрозащитное устройство;

- значения метеорологических параметров (температуры воздуха, влажности, атмосферного давления) во время измерений не выходили за рамки предельных значений, приведенных в технической документации на соответствующую измерительную аппаратуру [9, 10];

- во время проведения измерения шума оператор находился на расстоянии от измерительного микрофона не менее 0,5 м [11, 12];

- между измерительным микрофоном и источником шума не находились какие-либо лица или посторонние (особенно крупногабаритные) предметы;

- измерение шума проводились отдельно для дневного (с 7:00 до 23:00 ч) и для ночного (с 23:00 до 7:00 ч) периода при условии действия основных источников шума в соответствующий период;

- во время измерения шума зафиксирована вся необходимая информация об источнике (или источниках) шума, о месте, времени и условиях измерения, о применявшейся аппаратуре и о полученных результатах для внесения вышеуказанных данных в протокол измерений.

На объекте 1 проведены 24 замера, из них 13 замеров 16.06.2025 в ночное время и 11 замеров 17.06.2025 в дневное время. Характеристика микроклимата при проведении замеров приведена в табл. 1. Некоторые параметры измерялись самостоятельно, остальные определены по данным метеослужбы.

Пять измерений проводились на расстоянии 10–12 м от источника на уровне тележек колесных пар, 13 замеров – в закрытом лестничном проеме здания с витражными окнами (объект 1 на 3, 5, 9-м этажах здания), 6 измерений – на площадке возле офиса, отгороженной от железнодорожного полотна сплошным металлическим забором. По роду движения источники шума распределились в соответствии с диаграммой, представленной на рис. 2, а.

На объекте 2 проведено 14 измерений, из них 12 замеров 23.06.2025 в дневное время и

Таблица 1

Микроклимат при проведении замеров

Параметр	Объект 1	Объект 2
<i>Ночное время суток</i>		
Температура	+18 °С	+17 °С
Скорость ветра	2 (0,41)	5 м/с (0 м/с с порывами до 0,4–0,5 м/с)
Давление	757 мм рт. ст.	753 мм рт. ст.
Влажность	76 %	68 %
<i>Дневное время суток</i>		
Температура	+26 °С	+24 °С
Скорость ветра	2 м/с (0,9 м/с с порывами до 1,4 м/с)	5 м/с (1,17 м/с с порывами до 1,5–2 м/с)
Давление	757 мм рт. ст.	753 мм рт. ст.
Влажность	49 %	51 %

Примечание. Значения параметров приведены по данным метеослужбы, в скобках – самостоятельно измеренные.

два замера 23.06.2025 в ночное время. Сопутствующие метеоусловия приведены в табл. 1.

Измерения проводились на расстоянии 15–17 м от оси ближайшего к прибору пути двухпутного участка железной дороги и на территории, прилегающей к жилому дому, в 2,5–3 м от оконных рам 1-го этажа. По роду движения источники шума распределились в соответствии с диаграммой, представленной на рис. 2, б.

Результаты исследований

Результаты исследований в дневное и ночное время на объектах 1 и 2 представлены в табл. 2–5 (серые ячейки – ПДУ, красные – превышение ПДУ; белые – ниже или равны ПДУ).

На рис. 3 в схематичном варианте представлен исследуемый участок с зоной покрытия избыточного шума.

Обсуждение результатов

На двух объектах все произведенные замеры имеют превышения ПДУ шума на всех участках. Также хочется отметить, что на объекте 2 два замера фона без воздействия железнодорожного транспорта также имеют превышения ПДУ из-за наличия автобусной станции общественного автомобильного транспорта (посадка-высадка пассажиров, свист тормозной системы, повышенные обороты двигателя при трогании с места). Все замеры фонового шума от автомобильного транспорта имеют превышения ПДУ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами от 1–2 кГц. Превышение ПДУ по фоновому шуму составляет от 3 до 5 дБА, что является незначительным, учитывая отсутствие источников в ночное время. Наиболее высокое превышение ПДУ находится в диапазоне от 1–2 кГц.

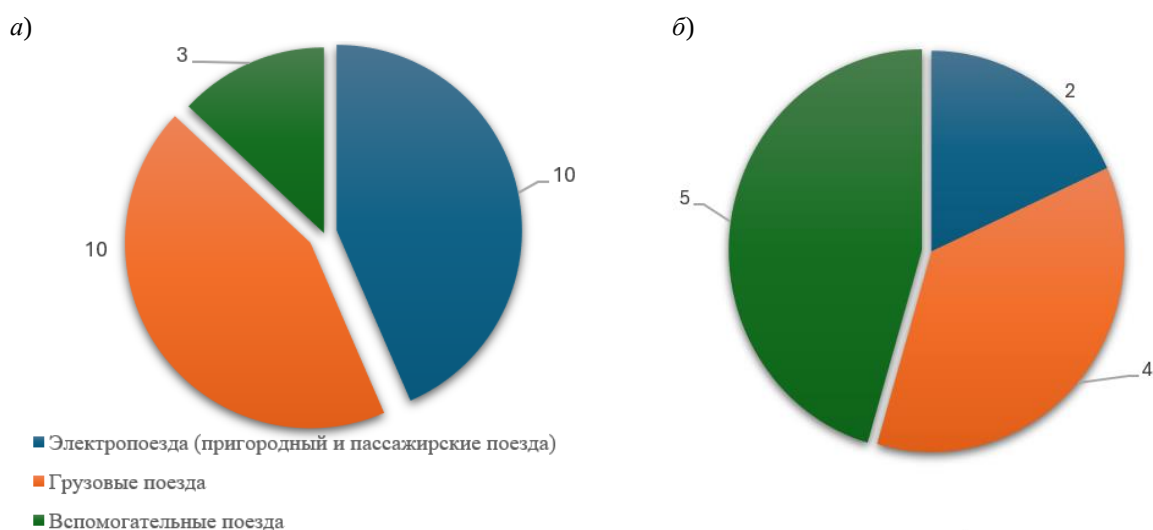


Рис. 2. Разновидности движения:
а – на объекте 1; б – на объекте 2

Таблица 2

Результаты замеров в дневное время суток на объекте 1

Условия замеров	Уровень звукового давления (эквивалентный уровень звукового давления), дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц									$L_{a \text{ экв}}$, дБА	$L_{a \text{ max}}$, дБА
	31,5	63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000		
ПДУ, п. 13 СП 51.13330.2011	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50	65
Поезд с полувагонами, уголь	72,5	67,1	61,7	64,1	65,5	63,4	61,1	58,2	53,4	68,4	80,6
Электропоезд	74,7	67	64,4	65,6	61	59,7	55	48,9	49,4	64,2	78,3
Грузовой сборный поезд	85,7	79,8	67,9	69,3	73	69,8	65,1	59,9	47,8	74,1	88,9
Транзитный электропоезд	78,2	69,2	60,1	66,4	69,6	66,4	61,9	54,8	42,5	70,8	80,3
Электропоезд	68,2	66,1	59,9	62,6	64,3	59,6	57,1	55,4	62,4	67,2	86,4
Контейнерный поезд груженный, скорость низкая	73,1	65,4	61	62	62,5	60,3	57,4	52,4	43,6	64,9	81,2

Примечание. $L_{a \text{ экв}}$ – эквивалентный уровень звука; $L_{a \text{ max}}$ – максимальный уровень звука.

Таблица 3

Результаты замеров в ночное время суток на объекте 1

Условия замеров	Уровень звукового давления (эквивалентный уровень звукового давления), дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц									$L_{a \text{ экв}}$, дБА	$L_{a \text{ max}}$, дБА
	31,5	63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000		
ПДУ, п. 13 СП 51.13330.2011	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50	65
Локомотив грузовой	64,9	58,4	62,5	65,2	58,5	57,1	52,6	47,4	37,1	61,9	88,3
Пассажирский поезд, скорость высокая	81,1	67,1	61,7	66,6	71,6	67	63,6	57,6	45,4	72,2	86,7
Грузовой контейнерный поезд	72,4	67,2	62,4	65,9	66,3	64,2	61,4	57	47,8	68,8	88,7
Шум кондиционера, 5-й этаж	63,4	59,7	56,8	56,9	52,6	52,5	46,6	41	34,5	56,2	88,5
Грузовой поезд, маршрут порожний (полувагоны платформы, свист колесных пар)	76,4	73,7	68,6	67,5	65,5	61,1	60,5	55,9	45,1	67,6	85,9
Мотриса, высокая скорость	70,3	50,7	49,3	52,3	49,9	48,6	41,7	35	29,9	52,3	88,6
Грузовой контейнерный поезд, (скорость средняя)	77,5	77	62,5	66,2	65,5	62,7	61,1	57,9	53,7	68,3	88,6
ПДУ, п. 23 СП 51.13330.2011	90	75	66	59	54	50	47	45	44	55	70
Одиночный локомотив	68,7	59,3	48,2	47,4	46,2	46,6	42,4	37,3	28,9	50,1	88,4
Контейнерный поезд груженный	76,7	75,5	67,9	65,5	63,4	61	58,5	54,3	44,1	66,2	88,8
Пассажирский поезд	73,6	66,5	60,9	61,8	65,7	65,6	59,8	54,2	41,6	68,5	88,6
Пассажирский поезд	73,7	67,1	59,8	62,8	65,5	63,5	57,2	50,7	39,6	67	88,6
Пассажирский поезд на низкой скорости	72,6	65,1	63,9	65	65,7	59,5	57,7	52,2	39,4	66	88,7
Поезд с полувагонами, груз – контейнеры	80,1	81,2	73	70	67,7	67,5	62,5	55,5	45,8	71,1	91,7

Таблица 4

Результаты замеров в дневное время суток на объекте 2

Условия замеров	Уровень звукового давления (эквивалентный уровень звукового давления), дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц									$L_{a \text{ экв}}$, дБА	$L_{a \text{ max}}$, дБА
	31,5	63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000		
ПДУ, п. 23 СП 51.13330.2011	90	75	66	59	54	50	47	45	44	55	70
Фон, шум от автодороги	61,5	66	64,6	59,3	53,1	55,2	49,1	42,9	34,4	58,7	76,2
Маневровый локомотив	69,4	72,8	66,7	62,6	57,8	58,4	52,9	48,4	40,8	62,2	81,7
Электропоезд (4 вагона с гудком)	71,4	73,9	67,4	62,5	57,2	58	64,3	57,4	46	67,4	84,7
Общий фон, шум авто	68,6	72,1	64,9	60,6	54,8	56,5	50,6	45,2	36,9	60	84
Поезд груженный, скорость низкая	74,8	78,7	71,1	64,2	58	59	55,7	50,2	37,8	63,9	89,8
Фон, шум авто, скрип тормозной системы пассажирских автобусов, свист	64,9	66,5	60,2	56,2	52,4	53,2	48,1	50,6	38,3	57,8	88,6
Маневровый локомотив, высокая скорость, гудки	62,7	65,3	64	61,9	59	59,2	59,4	50,2	50	64,4	80,1
Грузовой поезд, груженный, высокая скорость	77,1	82,1	74,2	68	62,9	63,4	62,9	60,3	57,5	69,7	90,2
Маневровый локомотив и вагон-дефектоскоп	60,9	63,8	60,4	58,5	52,2	55,1	49,7	45,3	34,7	58,4	79,6
2-секционный локомотив	65,4	66,5	66	65	55,9	54,8	52,4	50,4	45,5	61,5	80,5

Таблица 5

Результаты замеров в ночное время суток на объекте 2

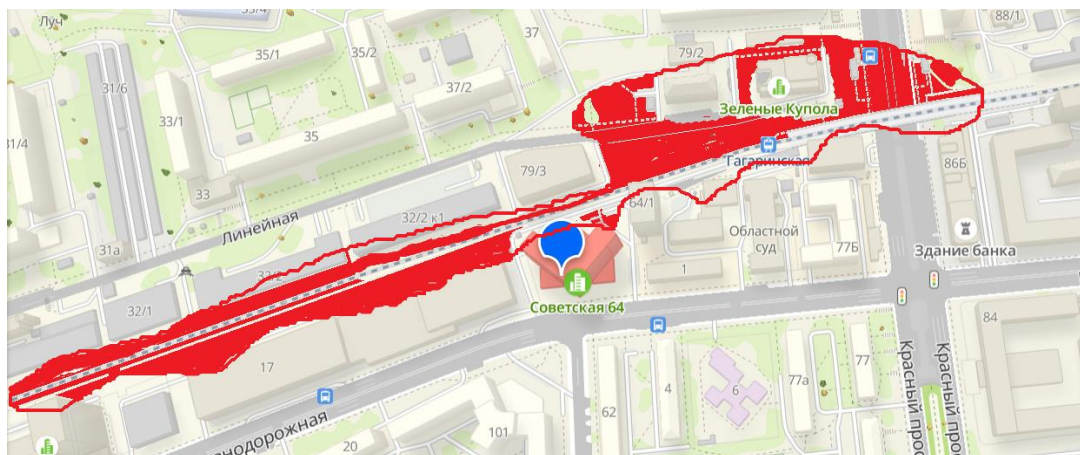
Условия замеров	Уровень звукового давления (эквивалентный уровень звукового давления), дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц									$L_{a \text{ экв}}$, дБА	$L_{a \text{ max}}$, дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
ПДУ, п. 23 СП 51.13330.2011	90	75	66	59	54	50	47	45	44	55	70
Маневровый локомотив и вагон-дефектоскоп	60,9	63,8	60,4	58,5	52,2	55,1	49,7	45,3	34,7	58,4	79,6
2-секционный локомотив	65,4	66,5	66	65	55,9	54,8	52,4	50,4	45,5	61,5	80,5

Превышение шума от источников железнодорожного транспорта достигает 15 дБА в октавных полосах со среднегеометрическими частотами от 500 Гц до 4 кГц.

Эквивалентный ($L_{a \text{ экв}}$) и максимальный ($L_{a \text{ max}}$) уровни звука превышают ПДУ до 25 дБА, особенно при движении груженных составов.

Проведя анализ результатов исследований по видам движения, авторы пришли к следующим выводам. Наиболее шумные виды подвижного состава – груженные вагоны, сборные поезда, полувагоны с углем, контейнерные поезда, движущиеся на средней и высокой скорости. Причиной превышения ПДУ является высокий вес поезда (как следствие,

а)



б)

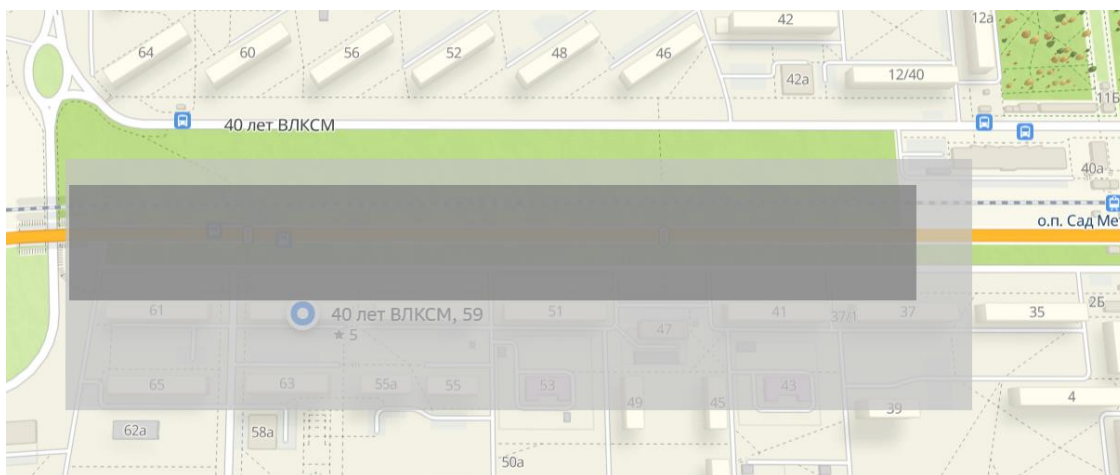


Рис. 3. Зона покрытия избыточного шума:
а – на объекте 1; б – на объекте 2

высокая нагрузка на верхнее строение пути – стук рельс, скрежет колесных пар, вибрация шпал), соударение полувагонов при прохождении кривых участков пути в автосцепке, свист и скрежет платформ и фитингов при движении контейнерного поезда. Все груженные поезда имеют превышения ПДУ в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами от 125 Гц до 8 кГц. По данному частотному спектру превышение ПДУ составляет от 9 до 15 дБА. Наиболее высокое превышение ПДУ находится в диапазоне от 500 Гц до 4 кГц. Эквивалентный и максимальный уровни звука превышают ПДУ в среднем от 15 до 25 дБА.

Вторыми по избыточному шуму являются пригородные и пассажирские поезда. Благодаря наиболее высокой интенсивности движения пригородных поездов их общий вклад в шумовое загрязнение участков не менее весомый, чем грузового движения. Избыточный шум сопровождается свистом колесных пар при торможении на участке замеров, частым использованием

железнодорожного гудка для сигнализации пассажирам о прибытии и отправлении пригородного поезда, скрипом и скрежетом при прохождении кривых участков. Электропоезда имеют превышения ПДУ в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами от 250 Гц до 8 кГц. По вышеуказанным частотам превышение ПДУ составляет от 6 до 17 дБА. Эквивалентный и максимальный уровни звука превышают ПДУ в среднем от 10 до 20 дБА. Все пригородные электропоезда имеют значительное превышение ПДУ на частоте 8 кГц, что связано с торможением перед остановочной платформой, а также производимым тормозной системой пригородного электропоезда свистом и скрипом. На частоте 500 Гц имеются значительные превышения ПДУ, примерно на 14–19 дБА, что свидетельствует о значительном вкладе в шумовое загрязнение железнодорожного гудка при прохождении участка замеров (наличие остановочной платформы, посадки-высадки пассажиров).

Менее значимый вклад в шумовое загрязнение на исследуемых участках отмечается в следующих случаях:

- на объекте 1 – при движении односекционного локомотива не наблюдалось превышения ПДУ на участке, при прохождении моторисы и грузового двухсекционного локомотива превышение ПДУ составило от 4–8 дБА;
- на объекте 2 – при движении вспомогательного подвижного состава с большей скоростью имело место превышение ПДУ в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами от 250 Гц до 8 кГц.

По вышеуказанным частотам превышение ПДУ составляет от 2 до 5–6 дБА. Эквивалентный и максимальный уровни звука превышают ПДУ в среднем от 4 до 7–10 дБА.

Выводы

Исходя из полученных результатов и их анализа рекомендуется для участка с наибольшей интенсивностью грузового движения (объект 1) в долгосрочной перспективе рассмотреть организацию обхода данной густо-

населенной селитебной зоны по примеру Московского центрального транспортного узла (вывод всего грузового движения из мест массового проживания населения непериферийных районов). На обоих участках следует рассмотреть возможность установки инновационных шумозащитных экранов на основе композитных материалов, например на объекте 1 установить шумозащитный экран вместо защитного забора остановочной платформы Гагаринская, тем самым объединить охранную и защитную функции ограждения. В ночное время организовать альтернативный регламент движения поездов на исследуемых участках (снижение скорости, подача звуковых сигналов только при наличии опасности или препятствий) с целью снижения избыточного шума в период отдыха и сна населения в селитебной зоне. Внедрить систему снижения скрипов и свистов при торможении пригородного подвижного состава путем внедрения технологии смазки техническими тормозными смазочными веществами.

Список источников

1. Павлова В. Л., Пирумова И. В., Калининченко Е. А. Техничко-экономическая эффективность систем защиты селитебных территорий от шума вагонных замедлителей // Вопросы новой экономики. 2022. № 1 (61). С. 80–86.
2. Затухание шума на территории жилой застройки вблизи станции И при различных атмосферных состояниях / В. Л. Павлова, Е. А. Калининченко, И. В. Пирумова, И. А. Селюнин // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 5 (72). С. 45–51.
3. Распространение звуковой волны с учетом архитектурно-планировочных и рельефных особенностей местности в районе станции И / В. Л. Павлова, В. И. Медведев, М. Ю. Квинт [и др.] // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 1 (73). С. 12–21.
4. Comparative analysis of noise reduction methods in car braking process on classification hump yards / E. A. Kalinichenko, I. V. Pirumova, R. G. Akhtyamov, V. V. Bondarenko // Transportation Research Procedia. 2022. Vol. 61. P. 526–531.
5. Защита селитебных территорий от шума сортировочной станции / Е. А. Калининченко, И. В. Пирумова, А. А. Басалаева, В. Л. Павлова // Железнодорожный транспорт. 2022. № 5. С. 42–45.
6. ГОСТ 23337–2014. Шум. Методы измерения шума на селитебной территории и в помещениях жилых и общественных зданий : (ISO 1996-1:2003, NEQ), (ISO 1996-2:2007, NEQ) : приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 ноября 2014 г. № 1643-ст введен в действие с 1 июля 2015 г. Москва : Стандартинформ, 2019. 24 с.
7. МУК 4.3.3722–21. Контроль уровня шума на территории жилой застройки, в жилых и общественных зданиях и помещениях : утверждены Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 27 декабря 2021 г. // Гарант : [сайт]. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/403287707/?ysclid=m2v6ltge4r961051563> (дата обращения: 12.10.2025).
8. СанПиН 1.2.3685–21. Гигиенические нормативы к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания : утверждены Постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 года № 2 : введены в действие с 01.03.2021. URL: https://ds278-krasnoyarsk-r04.gosweb.gosuslugi.ru/netcat_files/19/8/SP123685_21_0.pdf (дата обращения: 12.10.2025).
9. О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения : Федеральный закон № 52-ФЗ : (последняя редакция) : принят Государственной думой 12 марта 1999 г. : одобрен Советом Федерации 17 марта 1999 г. //

КонсультантПлюс : [сайт]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_22481/?ysclid=m2v6zvw4ty98967052 (дата обращения: 12.10.2025).

10. Об охране окружающей среды : Федеральный закон № 7-ФЗ : (последняя редакция) : принят Государственной думой 20 декабря 2001 г. : одобрен Советом Федерации 26 декабря 2001 г. // КонсультантПлюс : [сайт]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/?ysclid=m2v71jgesp296805337 (дата обращения: 12.10.2025).

11. СанПиН 2.1.3684–21. Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий : утверждены Постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 г. № 3 : введены в действие с 01.03.2021. // Гарант : [сайт]. URL: <https://base.garant.ru/400289764/?ysclid=m2v7426rme402584654> (дата обращения: 12.10.2025).

12. О защите прав потребителей : Закон Российской Федерации № 2300-1 : принят 7 февраля 1992 г. : (ред. от 08.08.2024) // КонсультантПлюс : [сайт]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_305/?ysclid=m2v763baic872458787 (дата обращения: 12.10.2025).

References

1. Pavlova V. L., Pirumova I. V., Kalinichenko E. A. Technical and economic efficiency of systems for protecting residential areas from noise of car decelerators. *Issues of the New Economy*. 2022;(61):80–86. (In Russ.).

2. Pavlova V. L., Kalinichenko E. A., Pirumova I. V., Selyunin I. A. Noise attenuation in residential areas near the I station under various atmospheric conditions. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(72):45–51. (In Russ.).

3. Pavlova V. L., Medvedev V. I., Quint M. Yu., Kosareva D. L., Kalinichenko E. A. Propagation of a sound wave taking into account the architectural and planning features of the terrain in the area of the I station. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(73):12–21. (In Russ.).

4. Kalinichenko E. A., Pirumova I. V., Akhtyamov R. G., Bondarenko V. V. Comparative analysis of noise reduction methods in car braking process on classification hump yards. *Transportation Research Procedure* 62 *Transportation Research Procedure*. 2022;(62):526–531. (In Russ.).

5. Kalinichenko E. A., Pirumova I. V., Basalaeva A. A., Pavlova V. L. Protection of residential areas from sorting station noise. *Railway Transport*. 2022;(5):42–45. (In Russ.).

6. GOST 23337–2014. Noise. Methods for measuring noise in residential areas and in residential and public buildings: (ISO 1996-1:2003, NEQ), (ISO 1996-2:2007, NEQ): by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated 18.11. 2014 No. 1643-st, entered into force on 01.07.2015. Moscow: Standartinform, 2019. 24 p.

7. MUK 4.3.3722–21. Noise level control in residential areas, in residential and public buildings and premises. Approved by the Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Wellbeing on 27.12.2021. *Garant: [website]*. (In Russ.). URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/403287707/?ysclid=m2v6ltge4r961051563>.

8. SanPiN 1.2.3685–21. Hygienic standards for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans. Approved by Resolution No. 2 of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated 28.01.2021: entered into force on 01.03.2021. (In Russ.). URL: https://ds278-krasnoyarsk-r04.gosweb.gosuslugi.ru/netcat_files/19/8/SP123685_21_0.pdf.

9. On the Sanitary and Epidemiological Welfare of the Population: Federal Law No. 52-FZ: (latest revision). Adopted by the State Duma on 12.03.1999. Approved by the Federation Council on 17.03.1999. *ConsultantPlus: [website]*. (In Russ.). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_22481/?ysclid=m2v6zvw4ty98967052.

10. On Environmental Protection: Federal Law No. 7-FZ: (latest revision). Adopted by the State Duma on 20.12. 2001. Approved by the Federation Council on 26.12.2001. *ConsultantPlus: [website]*. (In Russ.). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/?ysclid=m2v71jgesp296805337.

11. SanPiN 2.1.3684–21. Sanitary and epidemiological requirements for the maintenance of the territories of urban and rural settlements, water bodies, drinking water and drinking water supply, atmospheric air, soils, residential premises, the operation of industrial and public premises, the organization and implementation of sanitary and anti-epidemic (preventive) measures. Approved by Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of

the Russian Federation dated 28.01.2021, No. 3: introduced on 01.03.2021. *Garant*: [website]. (In Russ.). URL: <https://base.garant.ru/400289764/?ysclid=m2v7426rme402584654>.

12. On the Protection of Consumer Rights. Law of the Russian Federation No. 2300-1. Adopted on 07.02.1992: (as amended on 08.08.2024). *ConsultantPlus*: [website]. (In Russ.). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_305/?ysclid=m2v763baic872458787.

Информация об авторах

И. А. Селюнин – аспирант кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Сибирского государственного университета путей сообщения.

В. Л. Павлова – кандидат экономических наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

I. A. Selyunin – Postgraduate of the Life Safety Department, Siberian Transport University.

V. L. Pavlova – Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Life Safety Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 11.12.2025; одобрена после рецензирования 14.01.2026; принята к публикации 26.01.2026.

The article was submitted 11.12.2025; approved after reviewing 14.01.2026; accepted for publication 26.01.2026.

Научная статья
УДК 625.122
doi:10.52170/1815-9265_2026_78_24

Демпфирование сейсмического воздействия в модели упрочняющегося грунта с жесткостью при малых деформациях на примере железнодорожной насыпи

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

¹ «Ленгипрострой», 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 моделирования напряженно-деформированного состояния земляного полотна железной дороги с учетом сейсмического воздействия.

Целью работы является определение зависимости напряженно-деформированного состояния земляного полотна железной дороги от параметров демпфирования (свойств материала демпфирующего слоя, мощности этого слоя и его расположения в конструкции земляного полотна).

Использован принцип численного моделирования динамического воздействия методом конечных элементов. Моделирование производилось с применением акселерограммы, сгенерированной в программном комплексе Plaxis 2D. Рассмотрены отличительные особенности модели упрочняющегося грунта с жесткостью при малых деформациях, влияющие на полноценность моделирования сейсмического воздействия на земляное полотно.

Приведено описание принятых в исследовании ключевых параметров напряженно-деформированного состояния железнодорожной насыпи в ходе динамического воздействия. Среди них горизонтальные перемещения основной площадки земляного полотна, осадка по завершении землетрясения, напряжения в зоне формирования поверхности скольжения, удельная рассеянная энергия деформации в ходе сейсмического воздействия.

Произведены динамические расчеты напряженно-деформированного состояния железнодорожной насыпи при землетрясении с использованием модели упрочняющегося грунта с жесткостью при малых деформациях. Определено влияние динамических характеристик модального и гистерезисного демпфирования грунта насыпи и демпфирующего слоя на параметры напряженного-деформированного состояния земляного полотна железнодорожного пути.

Определены оптимальные параметры демпфирования для максимального снижения горизонтальных перемещений, осадки после землетрясения, уменьшения колебаний напряжений в земляном полотне, поглощения удельной рассеянной энергии деформации в ходе землетрясения. Подбор оптимальных параметров осуществлялся на основе сравнения вариантов демпфирования, различающихся мощностью и положением демпфирующего слоя (слоев) в конструкции насыпи.

Ключевые слова: земляное полотно, сейсмическое воздействие, модальное демпфирование по Рэлею, гистерезисное демпфирование, модель упрочняющегося грунта с жесткостью при малых деформациях

Для цитирования: Меркурьев Ю. С., Колос А. Ф. Демпфирование сейсмического воздействия в модели упрочняющегося грунта с жесткостью при малых деформациях на примере железнодорожной насыпи // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 1 (78). С. 24–37. DOI 10.52170/1815-9265_2026_78_24.

Original article

Damping of seismic impact in the hardening soil small model in case of railway subgrade

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 modeling the stress-strain state of a railway subgrade taking into account seismic impact is considered.

The aim of this study is to determine the dependence of the stress-strain state of a railway subgrade on damping parameters (the material properties of the damping layer, its thickness, and its location within the subgrade structure).

The principle of numerical modeling of dynamic action using the finite element method is used. Modeling was performed using a generated accelerogram in the Plaxis 2D software package. Distinctive features of a hardening soil model with small-strain stiffness, which affect the completeness of seismic impact modeling on the subgrade, are discussed.

A description of the key parameters of the stress-strain state of a railway embankment under dynamic action adopted in the study is provided. These include horizontal displacements of the top surface of subgrade, settlement after the earthquake, stresses in the slip surface formation zone, and the level of specific dissipated deformation energy during seismic action.

Dynamic calculations of the stress-strain state of a railway embankment during an earthquake were performed using a hardening soil model with small-strain stiffness. The influence of the dynamic characteristics of the modal and hysteresis damping of the embankment soil and damping layer on the stress-strain state parameters of the railway subgrade was determined.

Optimal damping parameters were determined to minimize horizontal displacements and settlement after an earthquake, reduce stress fluctuations in the subgrade, and absorb specific dissipated deformation energy during an earthquake. The selection of optimal parameters was carried out on the basis of a comparison of damping options that differ in the thickness and position of the damping layer (layers) in the embankment structure.

Keywords: subgrade, seismic impact, Rayleigh modal damping, hysteretic damping, hardening soil small model

For citation: Merkuryev Yu. S., Kolos A. F. Damping of seismic impact in the hardening soil small model in case of railway subgrade. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(78):24–37. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_78_24.

Введение

Основным фактором обеспечения безопасности движения поездов в сейсмически активных районах является поддержание стабильности земляного полотна, сооружаемого из грунтов различных свойств. В рамках данного исследования производится моделирование вынужденных колебаний земляного полотна железной дороги вследствие сейсмического воздействия. При этом грунту земляного полотна присваиваются различные динамические (демпфирующие) характеристики в целях определения влияния сейсмики на НДС земляного полотна.

Ранее [1] принципиально подтверждена возможность нейтрализации негативного воздействия сейсмики на НДС земляного полотна путем демпфирования конструкции на всю высоту насыпи или некоторого горизонтального слоя. Моделирование производилось в программном комплексе GEO5 МКЭ с использованием модели Мора – Кулона с заданием характеристик демпфирования через коэффициент относительного затухания ξ , определяемый параметрами Рэлея.

Во всех моделях грунтов, используемых в программном комплексе Plaxis, в соответствии с [2], в динамических расчетах возможно задание параметров Рэлея для моделирования эффекта модального демпфирования, что является искусственным влиянием на про-

цесс вычислений НДС в ходе численного расчета. Основное уравнение зависящего от времени перемещения объемного тела под воздействием динамической нагрузки, используемое для описания динамического поведения грунта и раскрывающее методику задания параметров Рэлея, рассмотрено в работе [3].

В настоящей работе исследуется поведение грунтового сооружения в виде земляного полотна с использованием модели упрочняющегося грунта с жесткостью при малых деформациях (hardening soil small – HSS). Этой моделью генерируется не только модальное, но и гистерезисное демпфирование. В статье [4] рассмотрены основные отличия модели HSS от других часто используемых моделей (линейно-упругой – LE, Мора – Кулона – МК и упрочняющегося грунта – HS) с точки зрения ее работы при циклическом воздействии и обоснован выбор именно модели HSS для исследования демпфирования сейсмического воздействия. В первой части настоящей статьи кратко проанализирован график зависимости осевой деформации от девиатора напряжений в модели HSS.

Результаты исследования, приведенные во второй части статьи, показывают, что использование в качестве грунта насыпи материала с повышенными демпфирующими характеристиками позволяет существенно снизить горизонтальные перемещения основной площадки зем-

В выводах определяются перспективные направления исследования в свете изученных вопросов моделирования НДС в ходе землетрясения.

Приведем краткое описание поведения модели упрочняющегося грунта с жесткостью при малых деформациях в динамическом расчете.

На рис. 1 разгрузка (участок 3–4–5) и повторная нагрузка (участок 5–6–3) в ходе трехосного испытания характеризуются криволи-

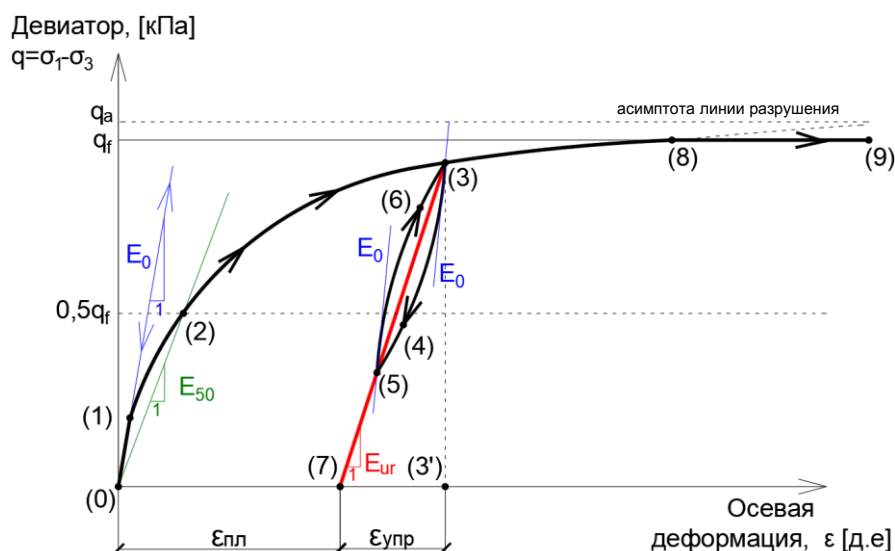


Рис. 1. Зависимость осевой деформации от девиатора напряжения в модели упрочняющегося грунта с жесткостью при малых деформациях в ходе трехосного испытания [4]

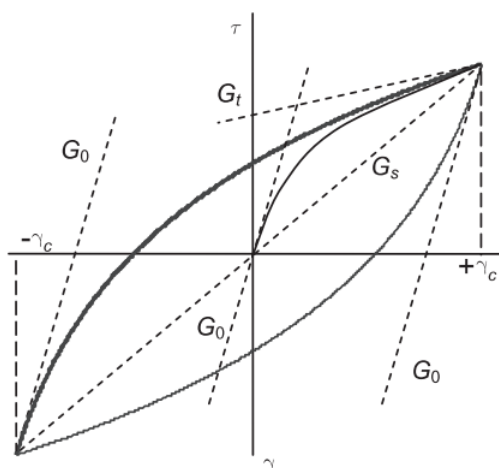


Рис. 2. Параметры жесткости в циклическом испытании на сдвиг [5]

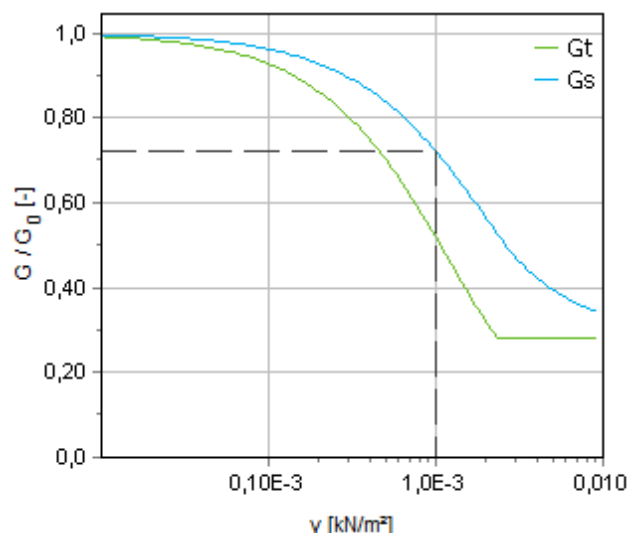


Рис. 3. Снижение нормализованного модуля сдвига G/G_0 в зависимости от значения сдвиговой деформации γ

нейной зависимостью, основным параметром которой является начальный модуль деформации E_0 , определяемый в соответствии с формулой

$$E_0 = 2G_0(1 + \nu_{ur}), \quad (1)$$

где G_0 – начальный модуль сдвига или модуль сдвига при сверхмалых деформациях, МПа; ν_{ur} – коэффициент Пуассона при разгрузке, повторном нагружении, д. е.

На рис. 2 и 3 отражены три взаимосвязанных модуля сдвига – начальный G_0 , секущий G_s и касательный G_t , с помощью которых описывается гистерезисное поведение в модели HSS и деградация сдвиговой жесткости.

Все эти факторы имеют существенное значение при оценке НДС грунтового сооружения в ходе динамического нагружения, которым является землетрясение. За счет проявления гистерезисного поведения в ходе сейсмического воздействия модель HSS генерирует дополнительные пластические деформации на каждом этапе действия нагрузки (будь то приложение или снятие), что, соответственно, приводит к практически постоянно действующему демпфированию. Так, при землетрясении в ходе реализации множества малых деформаций по обширному поперечному сечению грунтовой насыпи происходит поглощение существенной части энергии сейсмического воздействия.

С одной стороны, привязанная к конкретному виду грунта степень поглощения колебаний, измеряемая коэффициентом демпфирования D , %, в соответствии с ГОСТ 56353 [6], определяется через соотношение удельной

рассеянной энергии ΔW и энергии упругих деформаций W , определяемых по графику циклических испытаний на сдвиг (рис. 4):

$$D = \Delta W / 4\pi W, \quad (2)$$

где W – энергия упругих деформаций, кДж/м³; ΔW – удельная рассеянная энергия – часть общей работы, совершенной над единицей объема грунта в ходе динамического нагружения и соответствующей изменению его внутренней энергии (п. 3.15 ГОСТ 56353–2022 [6]), кДж/м³.

С другой стороны, на конкретном инженерном сооружении, а именно насыпи земляного полотна железной дороги, степень поглощения колебаний можно оценить путем сравнения различных расчетных случаев по показателям НДС. Расчетные случаи варьируются в зависимости от динамических показателей грунта насыпи и демпфирующего слоя.

Модель HSS, в дополнение модели HS, имеет параметр начального модуля сдвига G_0 и параметр деформации $\gamma_{0,7}$, определяющие гистерезисное демпфирование. Площадь петли гистерезиса (см. рис. 4) зависит от соотношения G_0 с модулем разгрузки E_{ur} и от амплитуды прикладываемой нагрузки (т. е. интенсивности землетрясения), что и определяет масштаб поглощения колебаний.

В математических моделях [7] грунта есть и иной способ задания демпфирования – модальный. Так же как и более простые модели (LE, МК, HS), модель HSS обладает параметрами модального демпфирования – коэффициентами Рэлея α и β .

За критерии эффективности демпфирования земляного полотна, как и в работе [4], приняты перемещение ОПЗП и напряжение в зоне формирования поверхности скольжения. В дополнение к названным параметрам в настоящей работе для анализа взяты осадка ОПЗП по завершении землетрясения и УРЭ сейсмической волны за время действия землетрясения, измеряемая в центре масс поперечного сечения.

Перемещение ОПЗП является косвенным показателем вероятности схода поезда с рельсов [8]. Осадка ОПЗП – показатель деформативности земполотна. Напряжение в зоне поверхности скольжения показывает степень приближения напряженного состояния к критическому, т. е. к состоянию разрушения. А величина УРЭ

сейсмической волны за время действия землетрясения является обобщающим показателем, характеризующим объем энергии сейсмического воздействия, влияющей на НДС сооружения.

Точки измерения приведенных параметров приняты аналогично [4] и изображены на рис. 5.

Результаты исследования

Для расчетов принята конструкция насыпи высотой 15 м с бермами шириной 4 м и крутизной откосов 1:1.5 – 1:1.75 – 1:2. Мощность основания принята 30 м. Глубина и ширина основания были проанализированы ранее в [1] и приняты исходя из условий:

а) границы расчетной схемы не должны влиять на НДС рассматриваемого сооружения

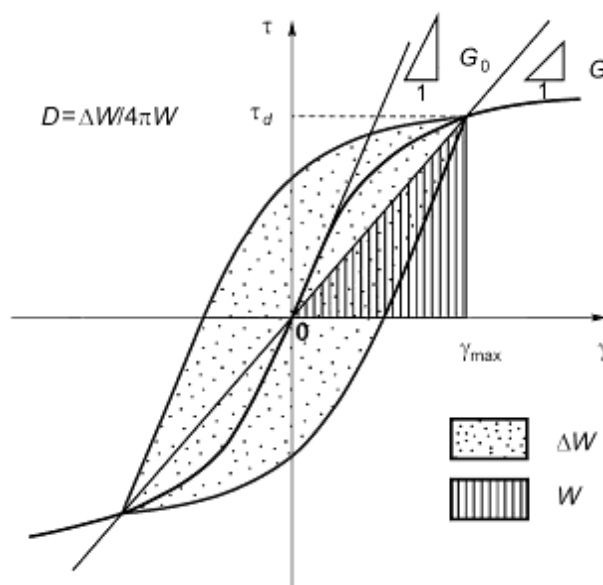


Рис. 4. График зависимости деформации сдвига от сдвигового напряжения в циклическом испытании на сдвиг

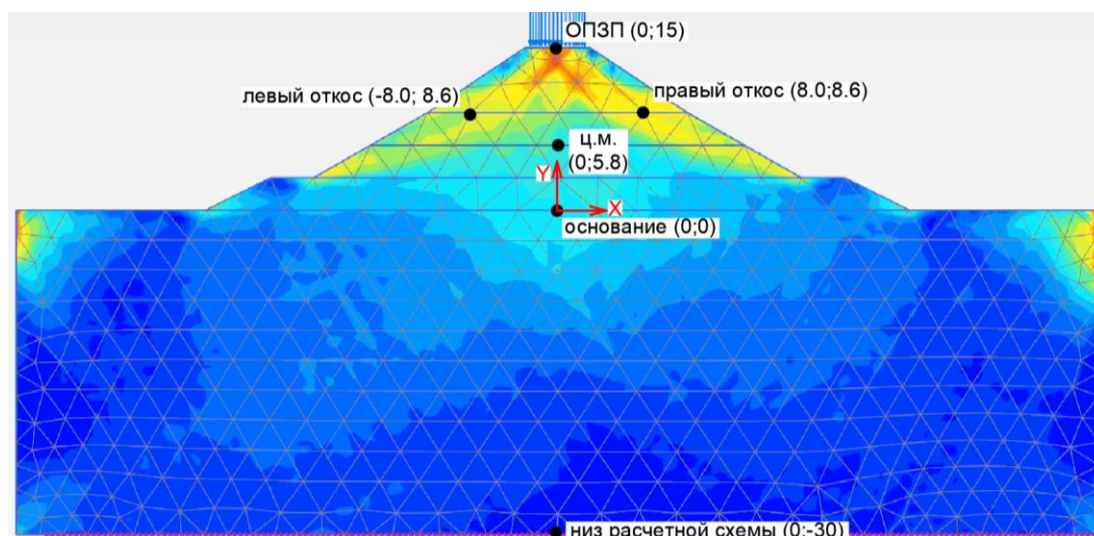


Рис. 5. Изоповрхности полной девиаторной деформации в насыпи и основании с изображением положения точек измерения

(как видно на рис. 5, области изменения напряжений на верхних углах основания не пересекаются с такими областями в сечении рассматриваемой насыпи);

б) размеры расчетной схемы позволяют проявиться предельным состояниям как самого сооружения, так и в области основания (п. 6.22 СП 358 [9]).

В качестве грунта основания и насыпи земляного полотна принят песок средней крупности, основные характеристики которого представлены в табл. 1. В исходной конструкции указанные характеристики присваиваются грунтам по всему поперечному сечению расчетной схемы.

Синтезированная акселерограмма (рис. 6) получена в программе GEO5 МКЭ с вводом ускорения в уровне основания. В соответствии с рекомендациями п. 5.2.2 СП 14 [10] для землетрясения интенсивностью 9 баллов принималось значение 4 м/с^2 .

Далее рассмотрим параметры НДС земляного полотна, по которым производится сравнение моделируемых вариантов конструкции. Среди них горизонтальные перемещения ОПЗП, осадка ОПЗП, главные напряжения в зоне формирования поверхности скольжения и удельная рассеянная энергия сейсмического воздействия.

Сейсмограммы, т. е. графики зависимости абсолютных перемещений элементов расчетной схемы (ОПЗП, основания, низа расчетной схемы) от времени по акселерограмме, для исходной недемпфированной конструкции при стандартных параметрах (см. табл. 1) приведены на рис. 7. Максимальное значение относительного перемещения (разность между абсолютным перемещением ОПЗП и абсолютным перемещением основания) составляет 75 мм. За критерий жесткости можно принять значение неисправности пути в плане согласно табл. 2.9 Инструкции по текущему содержанию пути [11]: в размере 50 мм для длины неровности до 40 м включительно при скорости до 60 км/ч. Рассчитываемое значение в сечении ОПЗП допустимо сравнивать со значением неровности в сечении уровня головки рельса в силу высокой жесткости балластной призмы и РШР.

Колебания конструкции насыпи в силу проявления свойств дилатансии грунта вызывают одновременное расползание и оседание насыпи. График вертикального смещения (осадки) ОПЗП и основания в процессе землетрясения отображен на рис. 8. Итоговая осадка недемпфированной насыпи на момент завершения землетрясения, рассчитанная как разница абсолютных осадок ОПЗП и основа-

Таблица 1

Исходные характеристики материала земляного полотна и основания

Показатель	Величина показателя
Удельный вес грунта γ , кН/м^3	18,0
Коэффициент Пуассона ν , д. е.	0,30
Модуль деформации $E_{\text{деф}}$, МПа	32,0
Секущий модуль деформации E_{50} , МПа	32,0
Угол внутреннего трения ϕ_{ef} , град	36,0
Удельное сцепление грунта c_{ef} , кПа	3,0
Угол дилатансии ψ , град	6,0
Модуль разгрузки E_{ur} , МПа	100,0
Модуль сдвига G , МПа	200,0
Деформации снижения модуля сдвига до значения $0,7G$ $\gamma_{0,7}$, д. е.	$0,1 \cdot 10^{-3}$

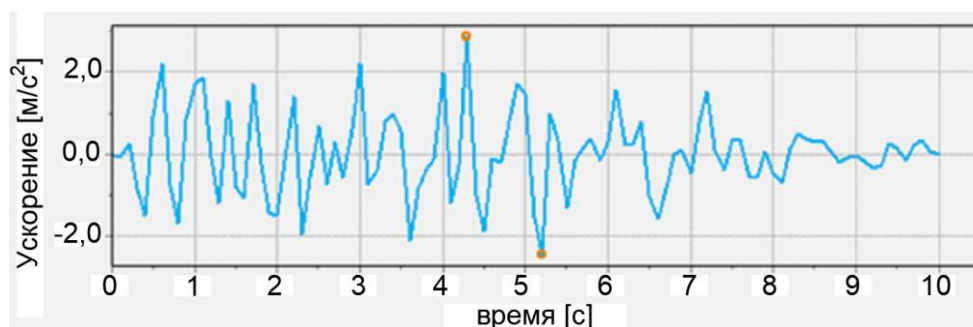


Рис. 6. Синтезированная акселерограмма землетрясения интенсивностью 9 баллов

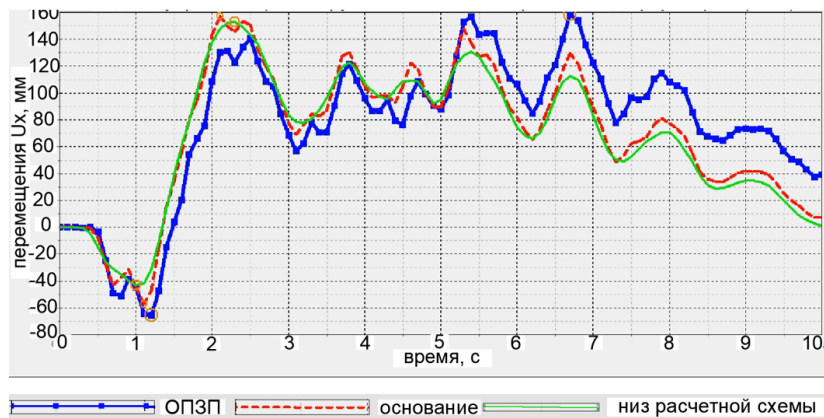


Рис. 7. Сейсмограммы ключевых точек расчетной схемы недемпфированного ж.-д. земполотна

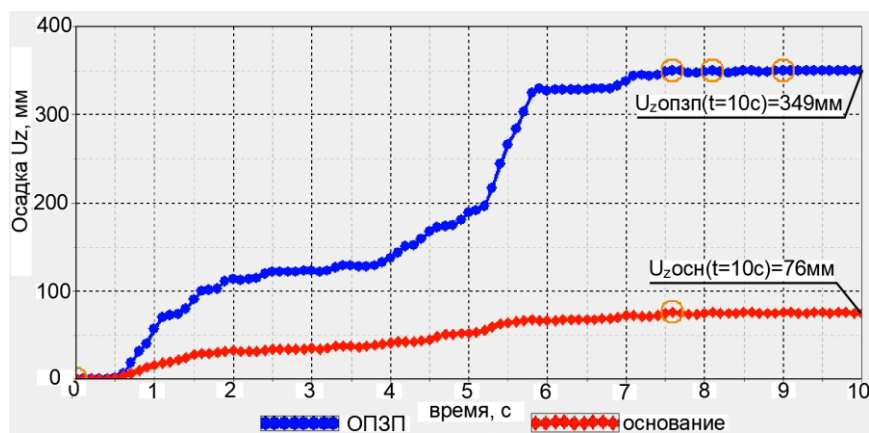


Рис. 8. Осадка основания и основной площадки недемпфированного ж.-д. земполотна



Рис. 9. Зависимость напряжений от времени по акселерограмме в точках формирования поверхности скольжения для недемпфированного ж.-д. земполотна

ния, составляет $346 - 76 = 273$ мм. В качестве критерия используется значение 100 мм для особо грузонапряженной линии по п. 6.2.4 СП 119 [12] несмотря на то, что в нормативе рассматривается осадка основания. Фактически заложенное в своде правил значение означает оседание всей насыпи, в том числе и основной площадки земполотна.

Для точек в зоне формирования поверхностей скольжения собраны данные по значениям полных главных напряжений. На рис. 9 приведены зависимости полных главных напряжений в правом и левом откосе насыпи от времени по акселерограмме. Поскольку сейсмическое воздействие является циклическим, то в откосах также циклически происхо-

дит изменение напряжений. Данное поведение практически симметрично относительно исходного напряжения. По завершении землетрясения напряжение возвращается в область исходных значений.

По представленному графику видно, что повышение до наивысшего значения в 105 кПа в момент времени $t = 5,5$ с происходит в течение долей секунды. В силу инерционности конструкции маловероятно, что такие скачки в конкретной точке могут привести к обрушению некоторого массива грунта по поверхности скольжения.

Для случая недемпфированной насыпи с параметрами, представленными в табл. 1, за время действия землетрясения значение УРЭ составило $\Delta W = 147$ Дж/м³. Данное значение определялось по площади внутри линии, которая огибает крайние точки графика зависимости деформации сдвига γ_{xy} от сдвигового напряжения τ_{xy} в точке центра масс поперечного сечения насыпи. Приведенный на рис. 10 график $\gamma_{xy} = f(\tau_{xy})$ принципиально схож по форме с приведенным в ГОСТ 56353–2022 [6]. Хаотичность траектории графика обуславливается:

- а) более сложной геометрией расчетной схемы земляного полотна, расположенного на толще основания, по сравнению с примитивной формой лабораторного образца;
- б) неравномерностью амплитуды деформации в центре масс насыпи вследствие действия беспорядочной сейсмической нагрузки, задаваемой по акселерограмме, по сравнению с циклическим равномерным возбуждением,

задаваемым в ходе стандартного лабораторного опыта.

В произведенном автором исследовании влияния демпфирования на устойчивость земляного полотна [3] определена зависимость коэффициента устойчивости от значений параметров Рэлея грунта насыпи в простейшей модели МК. Также определено оптимальное с точки зрения устойчивости положение демпфирующего слоя в конструкции насыпи по критерию экономии демпфируемого материала.

Во избежание повышения напряжений в откосах насыпи и, как следствие, повышения вероятности обрушения насыпи земляного полотна, а также для обеспечения безопасности движения через ограничение горизонтальных перемещений и осадки ОПЗП материалу задаются демпфирующие характеристики. Тем самым одновременно решаются две задачи – устойчивости и жесткости.

В табл. 2 и 3 представлены значения амплитуд относительных перемещений ОПЗП и основания, осадки ОПЗП по завершении землетрясения, максимальных напряжений в земполотне в точках формирования поверхности скольжения, а также значения УРЭ сейсмического воздействия в центре масс поперечного сечения в зависимости от параметров **модального** (см. табл. 2) и **гистерезисного** (см. табл. 3) **демпфирования**. Номеру расчетного геологического элемента (РГЭ) соответствует набор динамических характеристик грунта. Исходному состоянию (недемпфированное земполотно) присвоено обозначение РГЭ0.0.

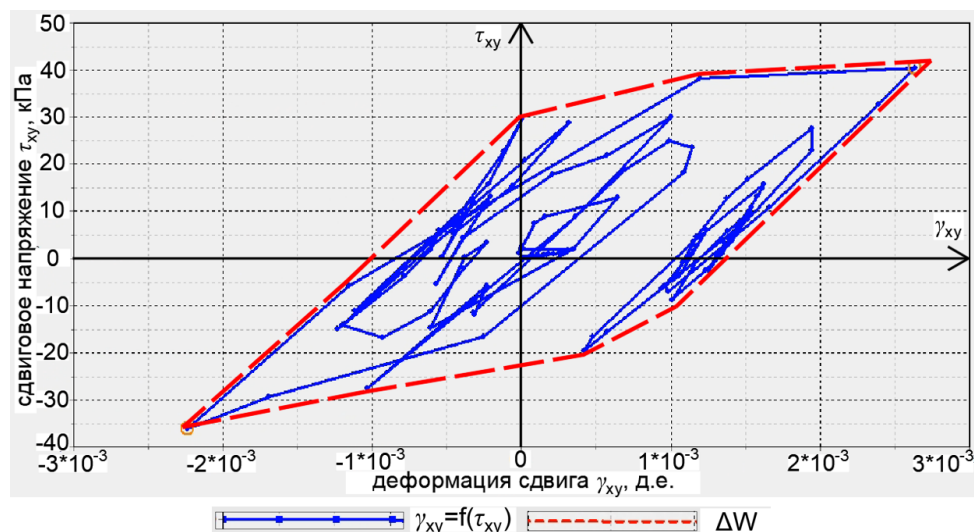


Рис. 10. График зависимости деформации сдвига от сдвигового напряжения в центре масс поперечного сечения в ходе сейсмического воздействия для недемпфированного ж.-д. земполотна

Таблица 2

Показатели НДС в конструкции земляного полотна в зависимости от параметров модального демпфирования при исходных параметрах гистерезисного демпфирования
 $G = 200 \text{ МПа}$ и $\gamma_{0,7} = 10^{-4}$

Показатель	Вариант демпфирования												
	0.0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Характеристики модаль- ного демпфирования:													
α, д. е.	0	0,05	0,2	0,4	1			0,01			0,05	0,2	0,4
β, д. е.	0	0,01			0,2	0,4	0,8	0,2	0,4	0,8	1		
Амплитуда перемещений в уровне ОПЗП U_x ОПЗП, мм	111	62	61	62	26	22	19	27	22	17	18	19	18
Амплитуда перемещений в уровне основания U_x осн, мм	72	73	72	71	69	71	70	72	74	73	75	74	72
Осадка ОПЗП по завершении землетрясения U_z ОПЗП, мм	273	83	81	80	44	29	19	41	30	12	17	16	16
Максимальное полное глав- ное напряжение σ ₁ , МПа	105	109	97	97	73	72	72	73	72	80	72	72	72
Удельная энергия сейсмиче- ской волны ΔW, Дж/м ³	147	49	35	39	0,81	0,21	0,07	0,77	0,02	0,02	0,08	0,08	0,07

Таблица 3

Показатели НДС в конструкции земляного полотна в зависимости от параметров гистерезисного демпфирования при нулевых характеристиках модального демпфирования $\alpha = \beta = 0$

Показатель	Вариант демпфирования								
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
Характеристики гистерезисного демпфирования:									
G , МПа	100	50	100	50	200	100	200	50	200
$\gamma_{0,7}$, д. е.	10^{-4}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-5}
Амплитуда перемещений в уровне ОПЗП $U_{x \text{ ОПЗП}}$, мм	111	113	113	118	96	83	58	108	117
Амплитуда перемещений в уровне основания $U_{x \text{ осн}}$, мм	72	72	75	73	73	75	77	72	73
Осадка ОПЗП по завершении землетрясения $U_{z \text{ ОПЗП}}$, мм	273	286	283	286	197	170	90	267	286
Максимальное полное главное напряжение σ_1 , МПа	105	107	112	109	97	94	122	109	110
Удельная рассеянная энергия ΔW , Дж/м ³	147	146	130	128	99	82	26	124	131

Модификации модального демпфирования: РГЭ1, РГЭ2, РГЭ3...РГЭ15; гистерезисного: РГЭ0.0, РГЭ0.1, РГЭ0.2...РГЭ0.8. Строчки с данными амплитуд перемещений в уровне оснований $U_{x \text{ осн}}$ показывают, что вне зависимости от параметров демпфирования насыпи колебания в уровне ее основания сохраняются практически на одном уровне. Это подтверждает ожидаемую картину распределения перемещений, состоящую в неизменности деформированного состояния ниже неизменяемой части расчетной схемы – земляного полотна.

По данным табл. 2 можно сделать вывод, что на модальное демпфирование земполотна для принятых параметров геометрии насыпи и

характеристик грунтов основания в условиях землетрясения, заданного определенной акселерограммой, параметр Рэлея β оказывает наибольшее влияние. Максимальный эффект достигнут при $\beta = 0,8$ (РГЭ9). Значение параметра α практически не оказывает влияния на уменьшение перемещений или напряжений.

Анализ табл. 3 показывает, что максимальное демпфирование достигается при максимальных модуле сдвига G и пороговой деформации $\gamma_{0,7}$. При этом гистерезисное демпфирование не столь выражено в сравнении с модальным. Также с увеличением жесткости наблюдается рост максимальных напряжений в конструкции.

Для дальнейшего исследования и поиска оптимальных мощности и положения демпфирующего слоя используется РГЭ9.0 с основными динамическими параметрами: $\alpha = 0,01$; $\beta = 0,8$; $G = 100$ МПа; $\gamma_{0,7} = 10^{-4}$. Графики зависимости перемещений, напряжений и осадки ОПЗП от времени по акселерограмме для насыпи из грунта из РГЭ9.0 представлены на рис. 11–13. На сейсмограммах рис. 11 видно, как ОПЗП и основание демпфированного земполотна синхронно двигаются в течение всего землетрясения, что говорит о минимальных относительных перемещениях ОПЗП относительно основания. На рис. 12 отмечено, как снижается полное глав-

ное напряжение, но вместе с этим осадка ОПЗП (см. рис. 13) заметно меньше, чем у недемпфированной насыпи (см. рис. 8). На рис. 14 представлены графики зависимости деформации сдвига γ_{xy} от сдвигового напряжения τ_{xy} в центре масс поперечного сечения в ходе сейсмического воздействия для демпфированного железнодорожного земполотна из грунта РГЭ0.6 (см. рис. 14, а) и РГЭ9.2 (см. рис. 14, б).

По приведенным графикам (см. рис. 11–14) демпфированного земполотна и табл. 2 и 3 можно сделать следующие выводы относительно влияния демпфирования всей насыпи на критерии НДС (сравнивая РГЭ0 и РГЭ9):

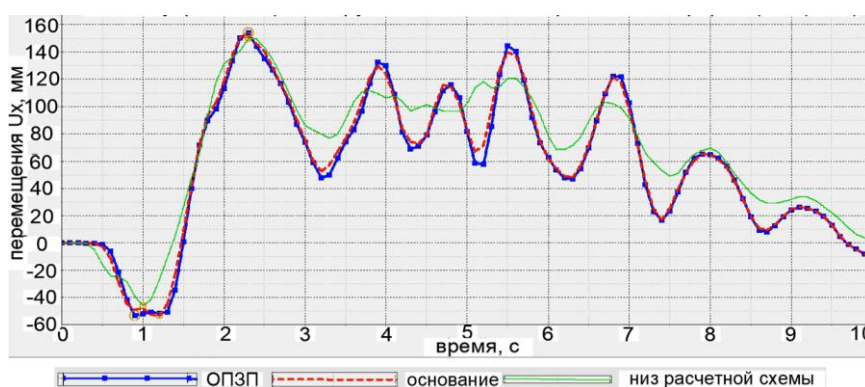


Рис. 11. Сейсмограммы элементов демпфированного ($\alpha = 0,01$; $\beta = 0,8$) земполотна

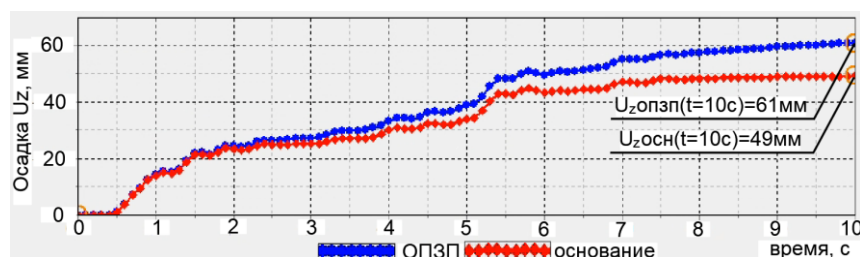


Рис. 12. Осадка элементов демпфированного ($\alpha = 0,01$; $\beta = 0,8$) земполотна

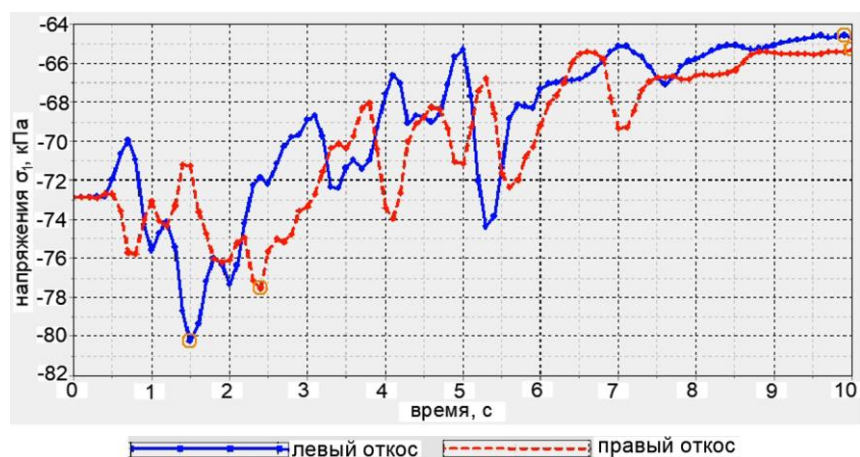


Рис. 13. Зависимости напряжений от времени по акселерограмме в приоткосных зонах в теле демпфированного ($\alpha = 0,01$; $\beta = 0,8$) земполотна

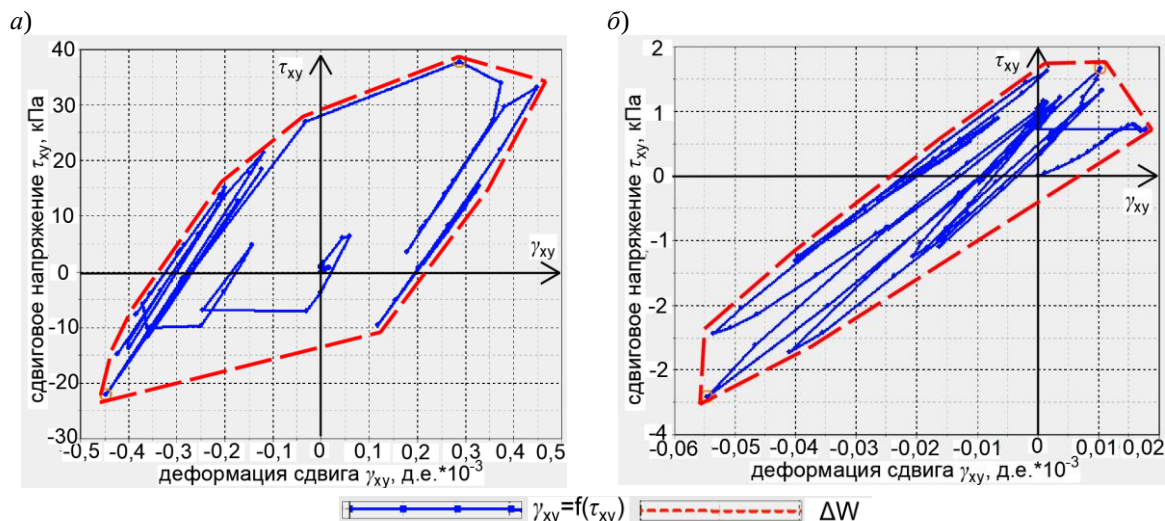


Рис. 14. График зависимости деформации сдвига от сдвигового напряжения в центре масс поперечного сечения в ходе сейсмического воздействия для демпфированного ж.-д. земполотна:

а – РГЭ0.6 ($\alpha = \beta = 0$; $G = 200$ МПа; $\gamma_{0,7} = 10^{-3}$); б – РГЭ9.2 ($\alpha = 0,01$; $\beta = 0,8$; $G = 200$ МПа; $\gamma_{0,7} = 10^{-3}$)

1. Существенно уменьшилась величина перемещения ОПЗП относительно основания (со 111 до 17 мм, см. рис. 11), т. е. уменьшилась возможность схода поезда.

2. Осадка ОПЗП после завершения землетрясения (см. рис. 12) существенно снизилась – с 270 до 12 мм, т. е. также уменьшилась вероятность крушения за счет образования барьерного места на пути движения поезда.

3. Существенно уменьшилась амплитуда колебаний напряжений (см. рис. 13), т. е. уменьшилась вероятность образования зон разрушений в поперечном сечении насыпи или нарушения устойчивости. Также в демпфированном земполотне уменьшились и сами напряжения за время действия землетрясения. Это связано с перераспределением напряжений и поворотом площадок главных напряжений относительно исходного положения.

4. Удельная рассеянная энергия (см. рис. 14) с помощью модального демпфирования может быть полностью нейтрализована (все значения с высокими значениями β в табл. 3). Такой уровень нейтрализации может говорить о нереальности существования подобного материала. Больше чем на порядок уменьшились предельные значения сдвиговой деформации и сдвигового напряжения, составив соответственно $\gamma_{xy} < \pm 0,07 \cdot 10^{-3}$, $\tau_{xy} < \pm 4$ кПа (при этом в исходной конструкции $\gamma_{xy} < \pm 3 \cdot 10^{-3}$, $\tau_{xy} < \pm 40$ кПа).

Далее на основе сравнения вариантов конструкций с демпфирующим слоем (слоями) различной толщины и расположением в кон-

струкции определяются оптимальные параметры демпфирования.

Автором произведено исследование влияния демпфирования на устойчивость земляного полотна, в котором определена зависимость коэффициента устойчивости от различных значений параметров Рэлея грунта насыпи в модели Мора – Кулона [4]. Также определено оптимальное с точки зрения устойчивости положение демпфирующего слоя (ДС) в конструкции насыпи по критерию экономии демпфируемого материала. По аналогии с работой авторов [4] в настоящем исследовании рассматривается зависимость показателей НДС от мощности ДС и его расположения в конструкции (табл. 4). Расчеты произведены для различных случаев, с различным размещением слоя по высоте. За ординату ноль принята подошва насыпи или поверхность земли.

По показателю осадки за год для достижения нормативного значения (100 мм для пассажирской линии согласно п. 6.2.4 СП 119 [12]), а также величины неровности пути в плане (50 мм для скорости до 60 км/ч по распоряжению РЖД № 2288 [11]) подходят варианты демпфирования 10, 11, 12, 13 и 14. При этом наименьший объем демпфирующего материала с принятыми характеристиками требуется при варианте 14, в котором демпфирующий слой укладывается на отметках с 3 до 6 м и с 9 до 12 м от основания насыпи. При этом объем демпфирующего материала на 100 м пути при общем объеме насыпи в 47 400 м³

**Показатели НДС в конструкции земляного полотна в зависимости от параметров
модального демпфирования**

Показатель	Вариант демпфирования														
	0.0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Мощность ДС, м	0	3	3	3	3	3	6	6	6	6	9	9	9	9	6
Отметки размещения ДС (за ординату ноль принят уровень основания насыпи)	–	0–3	3–6	6–9	9–12	12–15	0–6	3–9	6–12	9–15	0–9	3–12	6–15	0–3, 6–9, 12–15	3–6, 9–12
Объем материала ДС, м ³ на 1 пог. м при полном сечении в 474 м ³	0	177	119	88	59	32	296	207	147	91	384	266	179	297	178
Амплитуда перемещений в уровне ОПЗП $U_{х, ОПЗП}$, мм	111	83	82	82	78	88	65	56	53	73	38	33	50	46	50
Осадка ОПЗП по завершении землетрясения $U_{z, ОПЗП}$, мм	273	195	163	98	59	93	118	69	33	49	48	22	26	30	35
Максимальное полное главное напряжение σ_1 , МПа	105	105	107	112	109	97	94	122	109	109	109	109	109	109	109
Удельная энергия сейсмической волны W , Дж/м ³	147	99	9,0	52	178	76	0,9	0,6	55	175	0,5	0,4	49	55	1,1

составляет 17 800 м³, мощность демпфирующих слоев равна 6 м.

Выводы

Для уменьшения негативного влияния сейсмического воздействия на земполотно железной дороги эффективным мероприятием является демпфирование грунта насыпи.

Численное моделирование НДС земполотна во время землетрясения показало, что в результате применения в качестве грунта насыпи материала с определенными динамическими параметрами (модального демпфирования по Рэлею – α и β ; гистерезисного демпфирования – модуль сдвига G и пороговая деформация $\gamma_{0,7}$) можно добиться существенного снижения горизонтальных перемещений и осадки в уровне ОПЗП, максимальных полных главных напряжений в зоне формирования поверхности скольжения. Тем самым уменьшается вероятность схода поезда с рельсов во время землетрясения и разрушения

насыпи по поверхности скольжения. Снижение осадки ОПЗП по завершении землетрясения позволяет говорить о повышении комфортности и безопасности движения. Уменьшение локальных осадок ОПЗП снижает динамические колебания движущегося поезда в вертикальной плоскости.

В соответствии с приведенными результатами расчетов при принятых параметрах расчетной схемы и характеристиках грунта основания и насыпи для достижения наибольшего модального демпфирования следует увеличивать параметр Рэлея β . Оптимальным из рассмотренных оказалось значение $\beta = 0,80$, при этом параметр α не оказывает существенного влияния на демпфирование.

Вместе с тем с помощью гистерезисного демпфирования с увеличением модуля сдвига G и пороговой деформации $\gamma_{0,7}$ достигается меньший уровень нейтрализации влияния сейсмике на параметры НДС.

Поиск оптимальных параметров демпфирования – задача для конкретных инженерно-геологических условий, категории железной дороги, геометрии насыпи и используемого для ее отсыпки материала. Параметры демпфирования следует подбирать по критерию экономии демпфирующего материала при достижении нормативных показателей НДС.

Перспективными направлениями исследований в свете рассмотренного материала являются:

1) методика расчета резонансной частоты грунтового сооружения для более точного определения характеристик демпфирования α и β ;

2) методика получения материала с повышенными демпфирующими свойствами – параметрами Рэлея α и β ;

3) факторы влияния на параметры гистерезисного демпфирования G и $\gamma_{0,7}$;

4) определение значений критических перемещений основной площадки земляного полотна при заданной скорости движения поезда;

5) исследование стабильности земляного полотна с иными геометрическими характеристиками и геологическими условиями основания.

Список источников

1. Меркурьев Ю. С. Моделирование сейсмического воздействия на земляное полотно с демпфирующим слоем. Динамический расчет по акселерограмме // Вестник УрГУПС. 2023. № 4. С. 110–119.
2. Пособие по моделям материалов. PLAXIS CONNECT Edition V20. URL: https://bentleysystems.service-now.com/community?id=kb_article_view&sysparm_article=KB0108423 (дата обращения: 01.11.2025).
3. Меркурьев Ю. С. Влияние демпфирования по Рэлею на устойчивость земляного полотна железной дороги в условиях сейсмического воздействия // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. Вып. 3. С. 104–113. DOI 10.20295/2223-9987-2024-03-104-113.
4. Меркурьев 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.
5. Brinkgreve R. B. J., Kappert M. H., Bonnier P. G. Hysteretic damping in a small-strain stiffness model // Proc. NUMOG X. 2007. P. 737–742. URL: <https://www.researchgate.net/publication/267411874> (дата обращения: 02.11.2025).
6. ГОСТ Р 56353–2022. Грунты. Методы лабораторного определения динамических свойств дисперсных грунтов : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 14 апреля 2022 г. № 210-ст // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200183923> (дата обращения: 02.11.2025).
7. Мирный А. Ю., Мосина А. С. Математические модели грунтов для инженеров : монография. Москва : Геоинфо, 2024. 416 с.
8. Vibration of subgrade and evaluation of derailment coecient of train under combined earthquake moving train load / M. Gao, X. Xu, R. He [et al.] // Soils and Foundations. URL: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.12.005> (дата обращения: 01.11.2025).
9. СП 358.1325800.2017. Сооружения гидротехнические. Правила проектирования и строительства в сейсмических районах : утверждены приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 26 декабря 2017 г. № 1720/пр : введены в действие с 27 июня 2018 г. Москва : Стандартинформ, 2018. 50 с.
10. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах : актуализированная редакция СНиП II-7-81* : утверждены приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 24 мая 2018 г. № 309/пр : введены в действие с 25 ноября 2018 г. Москва : Стандартинформ, 2018. 116 с.
11. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути : распоряжение ОАО РЖД № 2288 : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14 ноября 2016 г. № 2288р. URL: <https://company.rzd.ru/api/media/resources/1503751> (дата обращения: 02.11.2025).
12. СП 119.13330.2024. Железные дороги колеи 1520 мм. СНиП 32-01-95 (с Изменением № 1) : утверждены и введены в действие приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 1 июля 2024 г. № 432/пр Москва : РСТ, 2024. 223 с.

References

1. Merkur'yev Yu. S. Modelling of seismic impact with a subgrade with a damping layer. dynamic calculations according to an accelerogram. *Herald of the Ural State University of Railway Transport*. 2023;(4):110–119. (In Russ.).
2. Manual on material models. PLAXIS CONNECT Edition V20. URL: https://bentleysystems.service-now.com/community?id=kb_article_view&sysparm_article=KB0108423.
3. Merkur'yev Yu. S. Rayleigh Damping influence on railway subgrade stability during seismic action. *Bulletin of Scientific Research Results*. 2024. Iss. 3. P. 104–113. (In Russ.). DOI 10.20295/2223-9987-2024-03-104-113.
4. Merkur'yev 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.
5. Brinkgreve R. B. J., Kappert M. H., Bonnier P. G. Hysteretic damping in a small-strain stiffness model. *Proceedings. NUMOG X*. 2007. P. 737–742. URL: <https://www.researchgate.net/publication/267411874>.
6. GOST R 56353–2022. Soils. Methods for laboratory determination of the dynamic properties of dispersed soils. Approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated 14.04.2022, No. 210-st. *Electronic Fund of Legal and Regulatory-Technical Documents*. (In Russ.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200183923>.
7. Mirny A. Yu., Mosina A. S. Mathematical Models of Soils for Engineers. Monograph. Moscow: Geoinfo Publishing House; 2024. 416 p. (In Russ.).
8. 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*. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.12.005>.
9. SP 358.1325800.2017. Hydraulic structures. Rules of design and construction in seismic-prone regions. Moscow: Standartinform; 2018. 50 p. (In Russ.).
10. SP14.13330.2018. Seismic building design code: Updated Version of SNiP II-7-81*. Moscow: Standartinform; 2018. 116 p. (In Russ.).
11. Order of Russian Railways No. 2288 14.11.2016 'Instructions for the Routine Maintenance of Railway Tracks'. (In Russ.). URL: <https://company.rzd.ru/api/media/resources/1503751>.
12. SP 119.13330.2024 Railway with 1520 mm gauge railways. SNiP 32-01-95 (with Amendment No. 1). Approved and put into effect by Order of the Ministry of Construction, Housing and Communal Services of the Russian Federation dated 1.07.2024 No. 432/pr. Moscow: Rosstandart; 2024. 223 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Ю. С. Меркурьев – ведущий инженер-проектировщик отдела путей и сооружений АО «Ленгипрострой».
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. Merkur'yev – Leading Design Engineer of the Tracks and Structures Department, AO Lengiprostroy.
A. F. Kolos – Doctor of Engineering, Vice-Rector for Economics and Informatization, Associate Professor of the Road Construction of the Transport Complex Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University.

Статья поступила в редакцию 05.11.2025; одобрена после рецензирования 26.01.2026; принята к публикации 09.02.2026.

The article was submitted 05.11.2025; approved after reviewing 26.01.2026; accepted for publication 09.02.2026.

Научная статья
УДК 625.111:69.003
doi:10.52170/1815-9265_2026_78_38

Оценка развития и формирования экспортно ориентированного транспортного коридора Россия – Монголия – Китай

Валерий Степанович Воробьев¹, Валерия Николаевна Мызникова²✉

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

¹ vorobjevvs@yandex.ru

² valeriamyz@mail.ru✉

Аннотация. В связи с изменением внешнеэкономического вектора развития Российской Федерации и формата производственно-логистических цепочек в Азиатско-Тихоокеанском регионе, на транспортные системы, в том числе Транссибирскую и Байкало-Амурскую магистрали, значительно возросла нагрузка. Эти магистрали, обеспечивающие экспортные поставки из Сибири на восток, уже испытывают трудности с увеличением грузопотока. Увеличение пропускной способности Восточного полигона до 240 млн т к 2035 г. в рамках третьего этапа развития, запланированного ОАО «Российские железные дороги», лишь частично решит проблему. В сложившейся ситуации необходимо создавать дополнительные транспортные коридоры в направлении азиатских стран. Это особенно важно для железнодорожного транспорта, который способен обеспечить большие объемы грузоперевозок по минимальным тарифам. В рамках расширения экономических связей с Монголией и Китаем предлагается провести предпроектные проработки двух железнодорожных веток: западной и северной, расходящихся в Арц сурь.

С позиции развития торгово-экономического сотрудничества стратегическое значение для всех стран имеет строительство газопровода. Монголии эффективное функционирование коридора позволит вывести экономику, в том числе социальное развитие, на новый уровень. В целях снятия инфраструктурных ограничений для экспорта сибирской продукции будет рассмотрена возможность строительства линии от Курагино до Кызыла и далее на юг, через Монголию, в Китайскую Народную Республику. Исследованы три наиболее вероятных сценария: равномерного вложения денежных средств, инерционного инвестирования, опережающего финансирования.

Ключевые слова: транспортная инфраструктура, транспортный коридор, строительство железных дорог, международные экономические связи, эффективность инвестиций

Для цитирования: Воробьев В. С., Мызникова В. Н. Оценка развития и формирования экспортно ориентированного транспортного коридора Россия – Монголия – Китай // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 1 (78). С. 38–46. DOI 10.52170/1815-9265_2026_78_38.

Original article

Assessment of development and formation of export-oriented transport corridor Russia – Mongolia – China

Valery S. Vorobyev¹, Valeriya N. Myznikova²✉

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

¹ vorobjevvs@yandex.ru

² valeriamyz@mail.ru

Abstract. Due to changes in the foreign economic directions of the Russian Federation and the process of changing the format of production and logistics chains in the Asia-Pacific region, transport systems, including the Trans-Siberian Railway and the Baikal-Amur Mainline, are under considerable strain. These highways, which provide export supplies from Siberia to the East, are already experiencing difficulties in increasing freight traffic. Increasing the capacity of the Eastern polygon to 240 million tonnes by 2035 as part of the third stage of development planned by Russian Railways will only partially solve the problem. In the current situation, it is necessary to create additional transport corridors in the direction of Asian countries. This is especially important for railway transport, which is able to provide large volumes of freight traffic at minimal tariffs. As part of the expansion of economic relations with Mongolia and China, it is proposed to carry out pre-project studies of two railway lines: western and northern, which will diverge in Arz Sur.

The construction of a gas pipeline is of strategic importance for all countries in terms of developing trade and economic co-operation. For Mongolia, the effective functioning of the corridor will bring the economy to a new level, including social development. In order to remove infrastructural restrictions for the export of Siberian products, the possibility of building a line from Kuragino to Kyzyl and further south through Mongolia to the People's Republic of China will be considered.

Keywords: transport infrastructure, transport corridor, railway construction, international economic relations, investment efficiency

For citation: Vorobyev V. S., Myznikova V. N. Assessment of development and formation of export-oriented transport corridor Russia – Mongolia – China. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(78):38–46. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_78_38.

Введение

Енисейская Сибирь, включающая Красноярский край, республики Тыва и Хакасия, – обширный регион, занимающий более 15 % территории России. Несмотря на значительный экономический потенциал, территориальная удаленность от незамерзающих морей, крупных рынков и центров производства и потребления приводит к высоким транспортным издержкам, что снижает эффективность экономики региона. Кроме того, недостаточно развитая транспортная инфраструктура во многих районах региона негативно влияет на социально-экономическую ситуацию, создавая факторы, препятствующие его развитию [1, 2].

В последнее время, в связи с изменением внешнеэкономической ситуации и формата производственно-логистических цепочек в Азиатско-Тихоокеанском регионе, на транспортные системы, в том числе Транссибирскую магистраль и БАМ, значительно возросла нагрузка. Эти магистрали, обеспечивающие экспортные поставки из Сибири на восток, уже испытывают трудности с увеличением грузопотока. Увеличение пропускной способности Восточного полигона до 240 млн т к 2035 г. в рамках третьего этапа развития, запланированного ОАО «РЖД», лишь частично решит проблему [2, 3]. В сложившейся ситуации необходимо создавать дополнительные транспортные коридоры в направлении азиатских стран. Это особенно важно для железнодорожного транспорта, который способен обеспечить большие объемы грузоперевозок по минимальным тарифам. Развитие таких коридоров принципиально важно для России, которая ориентирует свои логистические потоки на восток [3, 4].

В рамках расширения экономических связей с Монголией и Китаем предлагается провести предпроектные проработки двух железнодорожных веток: западной (Курагино – Кызыл – Цаган-Толгой – Арц сурь – Кобдо – Такешкен – район Хами – Чанцзи-Хуэйский автономный округ – Урумчи) и северной (Курагино – Кызыл – Цаган-Толгой – Арц сурь –

Овот – Эрдэнэт – Салхит – Замын-Ууд – Эрлянь – Уланчаб – Чжанцзякоу – Пекин – Тяньцзянь), расходящихся в Арц сурь.

Материалы и методы исследования

В исследовании использованы материалы научных публикаций, статистические и аналитические данные, проектные и предпроектные материалы, а также картографические источники.

Методическую основу составили аналитический и описательный методы, экспертная оценка, проектно ориентированный анализ, а также сценарный подход к оценке вариантов финансирования строительства железнодорожной инфраструктуры.

Результаты исследования

Россия, Монголия и Китай проявляют живой интерес к совместному сотрудничеству, регулярно встречаясь на полях саммита Шанхайской организации сотрудничества. Так, в сентябре 2022 г. страны договорились продлить на пять лет программу сотрудничества России, Монголии, Китая по различным стратегическим направлениям, содержащую 32 совместных проекта. В рамках формирования инфраструктурной основы на рис. 1 приведены варианты строительства железной дороги Россия – Монголия – Китай.

С позиции развития торгово-экономического сотрудничества для всех стран стратегическое значение имеет строительство газопровода. Монголии эффективное функционирование коридора позволит вывести экономику, в том числе социальное развитие, на новый уровень [5, 6].

Взаимная торговля между Россией и Монголией по итогам 2023 г. составила 2,7 млрд долл., что говорит о положительной динамике развития внешнеэкономических связей между странами. Также растет торговля по отдельным направлениям. В частности, в 2023 г. серьезно увеличились поставки в Монголию российской продукции агропромышленного комплекса: в 2,5 раза – кормов для животных, в 7 раз – злаков. В экспорте Монголии удельный вес российского направления составляет

более 1 %. Россия импортирует в Монголию 28,5 % товаров, из них более 90 % составляют нефтепродукты, 30 % электроэнергия.

В настоящее время существует несколько вариантов строительства железнодорожных коридоров, из которых наиболее целесообразным и экономически эффективным является проект создания Центрально-Евразийского меридионального транспортного коридора от Транссиба через Тыву до Монголии и Китая (ЦЕТК). В рамках данного взаимодействия

между странами ассоциации «Сибирское соглашение» предлагается создание Центрально-Евразийского транспортного коридора: Лесосибирск (Северо-Сибирская магистраль), Красноярск – Курагино – Кызыл – Цаган-Толгой – Урумчи.

В целях снятия инфраструктурных ограничений для экспорта сибирской продукции будет рассмотрена возможность строительства линии от Курагино до Кызыла и далее на юг, через Монголию, в КНР (рис. 2).



Рис. 1. Варианты строительства железной дороги Россия – Монголия – Китай

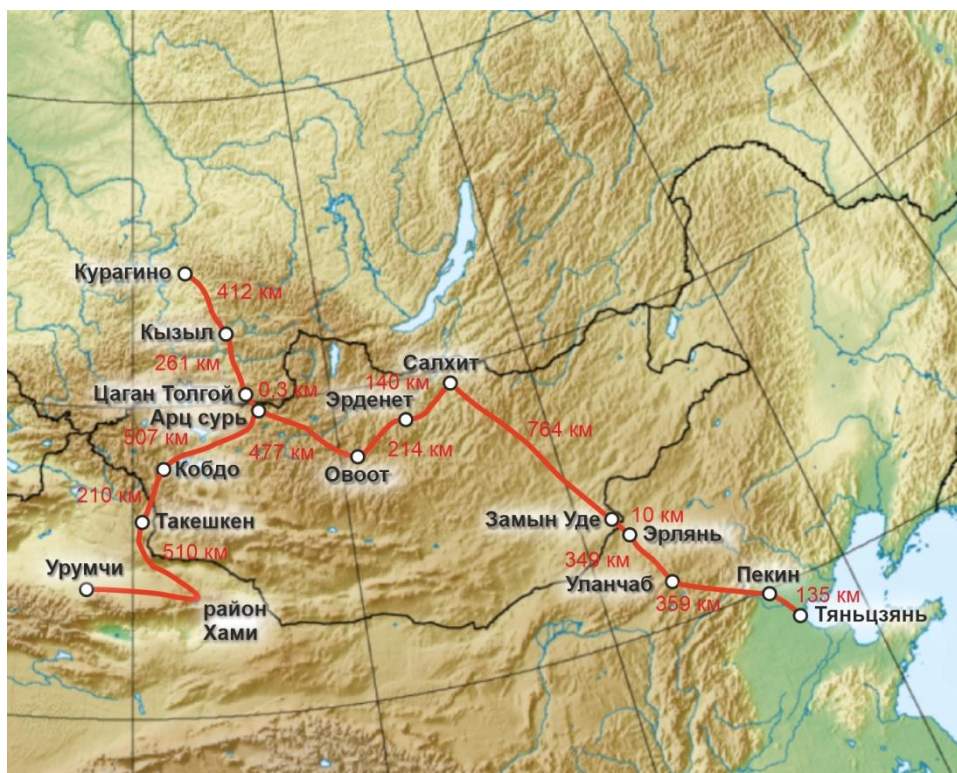


Рис. 2. Протяженность транспортного коридора Россия – Монголия – Китай (западная и северная ветки)

Разместим опорные точки маршрута на карте и определим примерную протяженность северной и западной веток транспортного коридора Россия – Монголия – Китай, а также природные зоны (см. рис. 2). Получим приведенные ниже данные по участкам маршрута.

Участок Курагино – Кызыл – Цаган-Толгой располагается на территории Российской Федерации, соединяя между собой Красноярский край и Республику Тыва, и является ответвлением от Красноярской железной дороги.

Курагино – существующая станция, относящаяся к Абаканскому отделению Красноярской железной дороги. Расположена на 491-м километре линии Новокузнецк – Абакан – Тайшет участка Южно-Сибирской магистрали. В районе поселка Курагино находятся значительные запасы лесных ресурсов, а также развито животноводство и сельское хозяйство. Таким образом, данная станция играет важную роль в экономической жизни региона, обеспечивая транспортировку товаров и сырья. Грузовой трафик через станцию включает в себя лесопroduкцию, уголь, металлы и другие товары, производимые и добываемые в Красноярском крае, а также пассажирский трафик [7].

В Кызыле развита обрабатывающая промышленность, которая включает переработку сельскохозяйственной продукции, производство строительных материалов и других промышленных товаров. В городе работают предприятия по производству кирпича, бетона и других строительных материалов, что важно для местной инфраструктуры и строительства. Также в районе Кызыла находится Элегестское угольное месторождение. Планируемое строительство железной дороги Курагино – Кызыл значительно улучшит транспортную доступность региона, что может способствовать привлечению инвестиций и появлению новых промышленных предприятий [8, 9].

Трудность в проектировании и строительстве железной дороги представляет сложный рельеф, который складывается из большого количества горных и холмистых участков, карстов, ущелий, крутых склонов. Также маршрут может пересекать долину р. Енисей и ее притоки. Эти участки требуют строительства мостов или водных переходов, чтобы обеспечить непрерывность движения поездов и минимизировать воздействие на природную

среду. Дорога Курагино – Кызыл должна пройти через разнообразный рельеф и включает семь тоннелей общей длиной 4 751,9 м и более 180 мостов с общей длиной 21,248 км. Самый длинный тоннель, Уюкский, будет проходить под Уюкским хребтом, его планируемая длина составит около 2 км [10].

Другая особенность данного региона – вечная мерзлота, представляющая вызов для строительства железной дороги. Она может требовать специальных методов инженерной защиты, таких как замораживание грунта, использование свайных оснований или применение теплоизоляционных материалов. Неправильное обращение с мерзлотой может привести к деформациям и повреждениям инфраструктуры. Каждый из этих типов грунтов имеет свои уникальные свойства, которые важно учитывать при проектировании и строительстве железнодорожной инфраструктуры. Грунты оказывают влияние на устойчивость путей, соблюдение требований к основаниям и дренажным системам, а также на общую эксплуатационную надежность и долговечность инфраструктуры [11, 12].

Рядом с железной дорогой Курагино – Кызыл проходят основные федеральные и региональные автомобильные магистрали. С учетом богатой водной сети в этом регионе речные порты могут играть важную роль в транспортной логистике.

Приведем основные важные пункты Монголии и Китая, способствующие развитию сети железных дорог:

1. Цаган-Толгой (Цагаан-Толгой) – автомобильный пропускной пункт между Россией и Монголией. Расположен в Чединском районе на юго-востоке республики, на левом берегу р. Улуг-Хем. Со стороны российской границы к пропускному пункту ведет федеральная трасса Р257 «Енисей».

2. Арц сурь – автомобильный пропускной пункт между Россией и Монголией. Расположен в Завханском аймаке (провинции) на северо-западе Монголии.

3. Кобдо (Kobdo) – административный центр Западного аймака Монголии, также известный как Ховд (Khovd). Этот регион находится в западной части страны и является одним из крупнейших. В Кобдо имеются запасы полезных ископаемых, включая золото, уголь, медь и другие металлы.

4. Такешкен – город в Синьцзян-Уйгурском автономном районе на западе Китая, расположенный вблизи границы с Монголией.

5. Хами (также известный как Хамы) – городской округ и административный центр префектуры Хами в Синьцзян-Уйгурском автономном районе Китая.

6. Чанцзи-Хуэйский автономный округ – автономный округ в Синьцзян-Уйгурском автономном районе КНР. По территории Чанцзи пролегают китайская республиканская трасса «Годао 312», Ланьсиньская и Вторая Урумчи-Цзинхэйская железные дороги.

7. Урумчи (Urumqi) – административный центр и крупнейший город Синьцзян-Уйгурского автономного района в Китае. Урумчи играет ключевую роль в экономике региона, представляя собой важный транспортный и торговый узел, связывающий Китай и Центральную Азию.

На рис. 3 приведена схема проектируемой железнодорожной линии Элегест – Кызыл – Курагино. Срок строительства этой железнодорожной линии составлял, по данным проектной документации, 60 мес.

Исходные данные позволили наметить три наиболее вероятных сценария инвестирования (рис. 4): равномерное вложение денежных средств (рис. 5); инерционное инвестирование (рис. 6); опережающее финансирование (рис. 7) [13]. Опыт прогнозирования инвестиций можно экстраполировать на прогнозирование железных дорог на территории Монголии и КНР.

На рис. 4 показано распределение затрат по трем сценариям финансирования (равномерному, инерционному и опережающему) для трех очередей строительства за период 2009–2025 гг.



Рис. 3. Схема проектируемой железнодорожной линии Элегест – Кызыл – Курагино

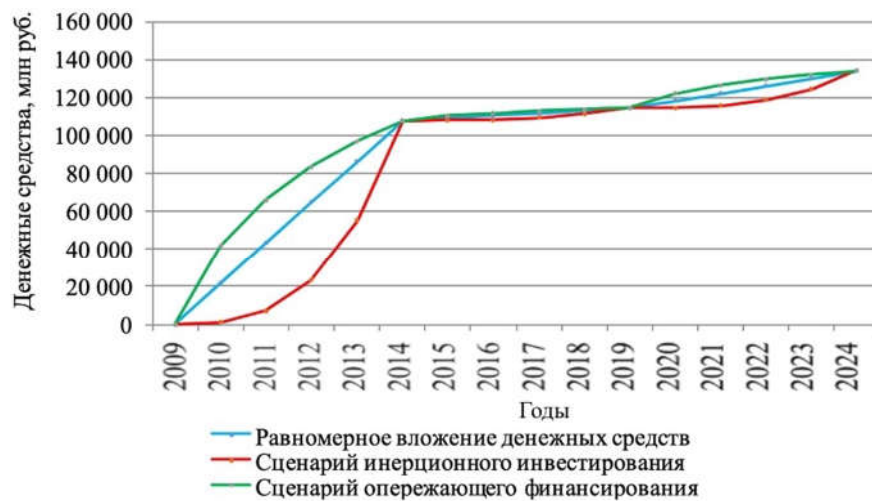


Рис. 4. Распределение затрат по трем сценариям финансирования для трех очередей строительства, млн р.

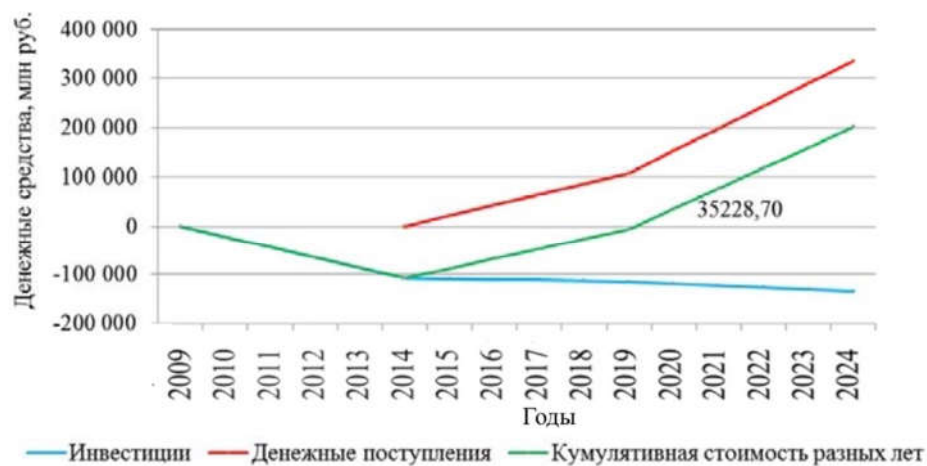


Рис. 5. Предварительная оценка эффективности инвестиций при равномерном вложении денежных средств для трех очередей, млн р.

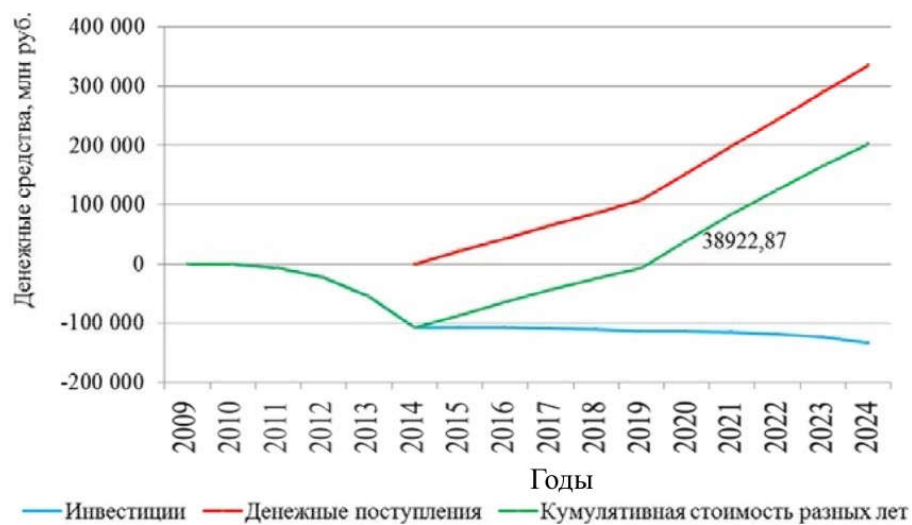


Рис. 6. Предварительная оценка эффективности инвестиций при инерционном вложении денежных средств для трех очередей, млн р.

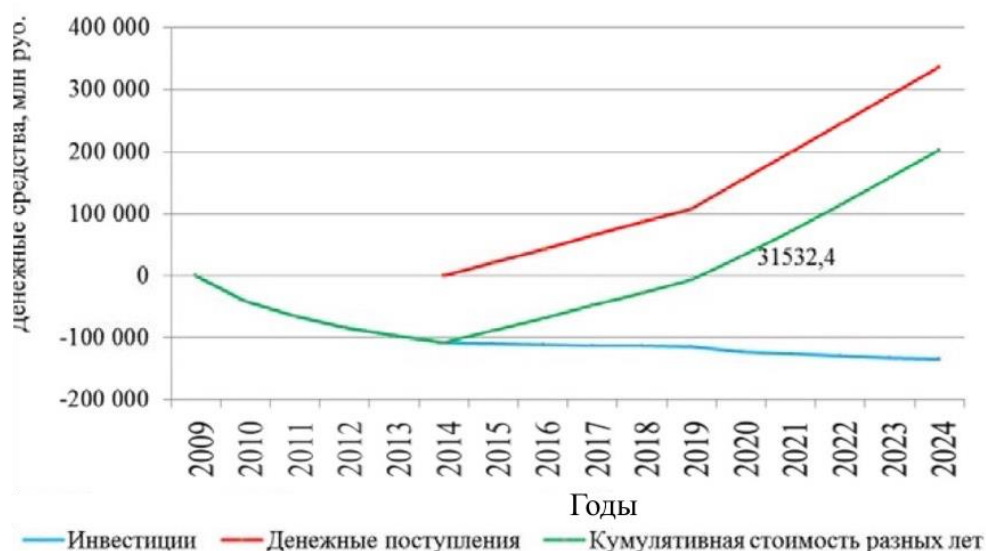


Рис. 7. Предварительная оценка эффективности инвестиций при сценарии опережающего финансирования для трех очередей, млн р.

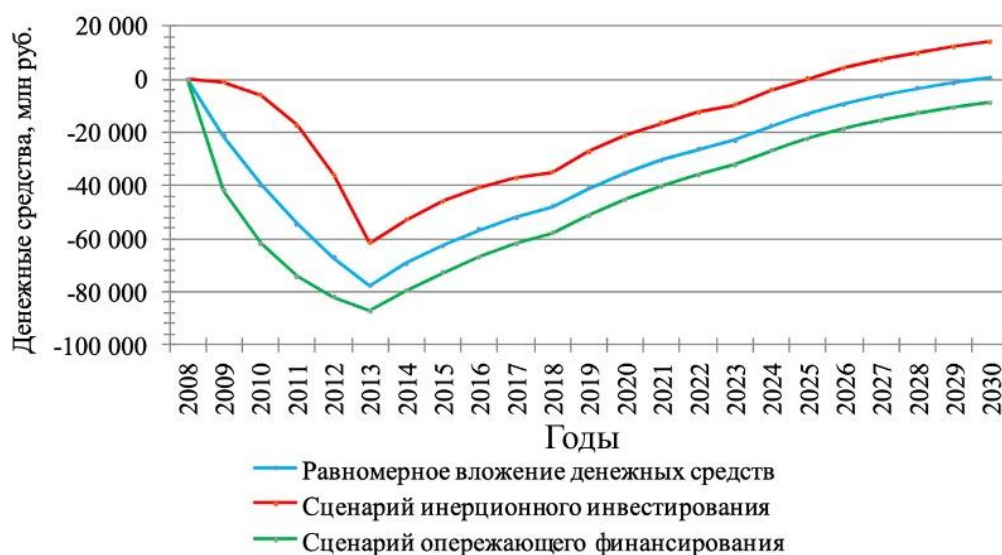


Рис. 8. Предварительная оценка эффективности инвестиций по трем сценариям развития, млн р.

Рисунки 5 и 6 иллюстрируют стабильный линейный рост эффективности инвестиций при равномерном и инерционном сценариях финансирования за период 2009–2025 гг.

Рисунок 7 отражает опережающий сценарий, при котором интенсивные вложения обеспечивают высокую и быструю отдачу по всем трем очередям строительства (2009–2025 гг.).

Сравнение общей эффективности трех сценариев финансирования (опережающего, равномерного и инерционного) за период 2008–2030 гг. приведено на сводном графике (рис. 8), вариант инерционного инвестирования показывает наивысший результат.

Заключение

На основании проведенного исследования можно заключить следующее:

1. Реализация Центрально-Евразийского транспортного коридора, примыкающего к п. Лесосибирск Северо-Сибирской магистрали, включающего станции Красноярск – Курагино – Кызыл – Цаган-Толгой, позволяет создать инфраструктурные условия для развития экономики и формирования транспортно-логистических сетей Сибири, Монголии и Китайской Народной Республики. Основным достоинством реализации Центрально-Евразийского транспортного коридора Лесосибирск

(Севсиб) – Красноярск – Курагино – Кызыл – Цаган-Толгой – Урумчи (КНР) является сокращение протяженности маршрута и времени доставки международных грузов на транспортной сети России.

2. Опорные точки маршрута, размещенные на карте, позволили определить примерное расстояние между ними согласно принятому подходу к определению эксплуатационной длины железной дороги на предпроектной стадии как суммы расстояний между основными населенными пунктами и выполнить исследование по прогнозу распределения инвестиций для трех очередей строительства по трем сценариям.

3. Установлено, что при относительно небольших отличиях распределения затрат по трем сценариям финансирования для трех очередей

строительства предпочтение может быть отдано сценарию инерционного инвестирования.

4. Реализация Центрально-Евразийского транспортного коридора, примыкающего к п. Лесосибирск Северо-Сибирской магистрали, включающего станции Красноярск – Курагино – Кызыл – Цаган-Толгой – Урумчи, ответвление от ЦЕТК: Курагино – Абакан – Новокузнецк, позволяет создать инфраструктурные условия для развития экономики Сибири и формирования транспортно-логистических сетей Сибири, Монголии и Китайской Народной Республики.

5. В настоящее время выполняется обособление грузовой базы транспортной сети, оценка ее влияния на территориальное развитие Сибири, продолжается обсуждение и анализ целесообразности ее проектирования на уровне комитетов Совета Федерации РФ.

Список источников

1. Аганбегян А. Г., Ибрагимова З. М. Сибирь на рубеже веков. Москва : Советская Россия, 1984. 272 с.
2. Безруков Л. А. Транспортно-экономические контрасты Енисейской Сибири // ЭКО. 2022. № 2. С. 47–67. DOI 10.30680/ECO0131-7652-2022-2-47-6.
3. Безруков Л. А. Транспорт Сибири // География Сибири в начале XXI века. В 6 т. Т. 3. Хозяйство и население / под ред. С. В. Рященко, Н. М. Сысоевой. Новосибирск : Гео, 2014. С. 81–108.
4. Безруков Л. А. Проблемы формирования транспортной системы Сибирской Арктики // ЭКО. 2018. № 4. С. 29–47. DOI 10.30680/ECO0131-7652-2018-4-29-47.
5. Оценка перспектив создания Северного широтного транспортного коридора / Ю. Ш. Блам, В. А. Крюков, В. Ю. Малов [и др.] // ЭКО. 2016. № 5. С. 28–43.
6. Бухарова Е. Б. Нужны новые механизмы государственной региональной политики // ЭКО. 2018. № 6. С. 38–49.
7. Веселова Э. Ш. «Енисейская Сибирь» – первый макрорегион России // ЭКО. 2018. № 6. С. 20–37. DOI 10.30680/ECO0131-7652-2018-6-20-37.
8. Каючкин Н. П. Географические основы транспортного освоения территории. Новосибирск : Наука, 2003. 167 с.
9. Кудияров С. Добраться до Транссиба // Эксперт. 2019. № 15. С. 46–49. (Специальное обозрение «Транспорт»).
10. Малов В. Ю., Тарасова О. В., Ионова В. Д. Нижнее Приангарье как «связующее звено» между севером и югом Сибири // ЭКО. 2018. № 6. С. 50–71. DOI 10.30680/ECO0131-7652-2018-6-50-71.
11. Поворот на Восток: Развитие Сибири и Дальнего Востока в условиях усиления азиатского вектора внешней политики России / отв. ред. И. А. Макаров. Москва : Международные отношения, 2016. 448 с.
12. Ткаченко В. Я. Проблемы формирования опорной транспортной сети Сибири. Новосибирск : ИЭОПП СО РАН, 1999. 208 с.
13. Воробьев В. С., Мызникова В. Н. Некоторые аспекты организационно-технологических решений проекта строительства и эксплуатации объектов инфраструктуры железной дороги Элегест – Кызыл – Курагино // Политранспортные системы : материалы XI Международной научно-технической конференции (12–13 ноября 2020 г.). Новосибирск : Изд-во Сиб. гос. ун-та путей сообщения, 2020. 965 с.

References

1. Aganbegyan A. G., Ibragimova Z. M. Siberia at the turn of the century. Moscow: Soviet Russia; 1984. 272 p. (In Russ.).
2. Bezrukov L. A. Transport and Economic Contrasts of Yenisey Siberia. *ECO*. 2022;(2):47–67. (In Russ.). DOI 10.30680/ECO0131-7652-2022-2-47-6.

3. Bezrukov L. A. Transport of Siberia. Edited by S. V. Ryashchenko, N. M. Sysoeva. *Geography of Siberia at the beginning of XXI century*. In 6 vol. Vol. 3. Economy and population. Novosibirsk: 'Geo'; 2014. P. 81–108. (In Russ.).
4. Bezrukov L. A. Problems of the Siberian Arctic transport system formation. *ECO*. 2018;(4):29–47. (In Russ.). DOI 10.30680/ESO0131-7652-2018-4-29-47.
5. Blam Yu. Sh., Kryukov V. A., Malov V. Yu. [et al.]. Assessment of the prospects of creating the Northern Latitudinal Transport Corridor. *ECO*. 2016;(5):28–43. (In Russ.).
6. Bukharova E. B. Need new mechanisms of state regional policy. *ECO*. 2018;(6):38–49. (In Russ.).
7. Veselova E. Sh. 'Yenisei Siberia' – the first macro-region of Russia. *EKO*. 2018;(6):20–37. (In Russ.). DOI 10.30680/ESO0131-7652-2018-6-20-37.
8. Kayuchkin N. P. Geographical bases of transport development of the territory. Novosibirsk: Nauka; 2003. 167 p. (In Russ.).
9. Kudiyarov S. Getting to the Trans-Siberian. *Expert*. 2019;(15):46–49. (Special review 'Transport'). (In Russ.).
10. Malov V. Yu., Tarasova O. V., Ionova V. D. Lower Priangarie as a 'connecting link' between the north and south of Siberia. *ECO*. 2018;(6):50–71. (In Russ.). DOI 10.30680/ECO0131-7652-2018-6-50-71.
11. Pivot to the East: Development of Siberia and the Far East in the conditions of strengthening the Asian vector of Russia's foreign policy. Edited by I. A. Makarov. Moscow: International Relations; 2016. 448 p. (In Russ.).
12. Tkachenko V. Ya. Problems of formation of the backbone transport network of Siberia. Novosibirsk: IEOPP SB RAS; 1999. 208 p. (In Russ.).
13. Vorobjov V. S., Myznikova V. N. Some aspects of organisational and technological solutions of the project of construction and operation of infrastructure facilities of the railway Eleget – Kyzyl – Kuragino. *Polytransport Systems. Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference (12–13 November 2020)*. Novosibirsk: Publishing house of Siberian Transport University; 2020. 965 p. (In Russ.).

Информация об авторах

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

В. Н. Мызникова – аспирант кафедры «Технология, организация и экономика строительства» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

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

V. N. Myznikova – Postgraduate of the Technology, Organisation and Economics of Construction Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 27.01.2026; одобрена после рецензирования 09.02.2026; принята к публикации 10.02.2026.

The article was submitted 27.01.2026; approved after reviewing 09.02.2026; accepted for publication 10.02.2026.

Научная статья
УДК 656.073
doi:10.52170/1815-9265_2026_78_47

Транспортные решения для грузовладельцев по перевозке котельного оборудования в северном направлении

Сергей Эдуардович Ольховиков¹, Елена Алексеевна Петренева²✉

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

¹ smot@mail.ru

² petreneva.ea@mail.ru✉

Аннотация. Статья посвящена разработке транспортно-логистических схем для грузовладельцев, которые планируют перевозки негабаритного оборудования в направлении северных регионов России. Выбор данной темы обусловлен сложностью поиска логистических решений при доставке крупногабаритных грузов в северном направлении.

Цель данного исследования заключается в разработке эффективных транспортно-логистических моделей для доставки крупногабаритного котельного оборудования в северном направлении с акцентом на экономическую оправданность и снижение рисков.

В ходе исследования предстояло решить следующие задачи: изучить существующие подходы к перевозке негабаритных грузов, проанализировать особенности транспортировки в условиях Крайнего Севера, спроектировать мультимодальные схемы доставки, произвести сравнительный анализ стоимости и временных показателей различных способов, идентифицировать риски и выработать рекомендации по их минимизации.

Что касается актуальности и научной новизны, то была разработана технология перевозок грузов в условиях Крайнего Севера, определены затраты, учитывающие особенности данного вида перевозки.

Исследование актуально ввиду растущих потребностей в доставке промышленного оборудования в отдаленные регионы России, включая Арктическую зону, отсутствия универсальных решений, адаптированных к экстремальным условиям Крайнего Севера, необходимости оптимизации затрат и сроков транспортировки при сохранении безопасности груза.

Ключевые слова: мультимодальные перевозки, транспорт, грузоперевозки, сохранность грузов, логистика

Для цитирования: Ольховиков С. Э., Петренева Е. А. Транспортные решения для грузовладельцев по перевозке котельного оборудования в северном направлении // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 1 (78). С. 47–55. DOI 10.52170/1815-9265_2026_78_47.

Original article

Transport solutions for cargo owners to transport boiler equipment in the northern direction

Sergey E. Olkhovikov¹, Elena A. Petreneva²✉

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

¹ smot@mail.ru

² petreneva.ea@mail.ru✉

Abstract. The article is devoted to the development of transport and logistics schemes for cargo owners who plan to transport oversized equipment to the northern regions of Russia. The choice of this topic is based on an analysis of existing logistics solutions for the delivery of oversized cargo in the northern direction.

The purpose of this study is to develop effective transport and logistics models for the delivery of oversized boiler equipment in the northern direction, with a focus on economic feasibility and risk reduction.

The study aimed to solve the following tasks: to study existing approaches to the transportation of oversized cargo, to analyze the specifics of transportation in the Far North, to design multimodal delivery schemes, to conduct a comparative analysis of the cost and time indicators of various methods, to identify risks and develop recommendations for their minimization.

As for the relevance and scientific novelty, a cargo transportation technology has been developed in the conditions of the Far North, and costs have been determined that take into account the specifics of this type of transportation.

The study is relevant due to the growing need to deliver industrial equipment to remote regions of Russia, including the Arctic zone, the lack of universal solutions adapted to the extreme conditions of the Far North, and the need to optimize transportation costs and times while maintaining cargo safety.

Keywords: multimodal transportation, transport, cargo transportation, cargo safety, logistics

For citation: Olkhovikov S. E., Petrenea E. A. Transport solutions for cargo owners to transport boiler equipment in the northern direction. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(78):47–55. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_78_47.

Введение

Главные особенности районов Крайнего Севера (РКС) – это экстремальные климатические условия и слаборазвитая транспортная сеть, что оказывает значительное влияние на логистику в любое время года. Перевозка крупногабаритного оборудования на удаленные территории представляет собой одну из самых сложных логистических проблем. Несмотря на развитие транспортной инфраструктуры, доставка в РКС сопряжена с серьезными трудностями, среди которых ограниченные возможности навигации, суровые климатические условия, отсутствие устойчивых дорожных покрытий и высокая зависимость от мультимодальных транспортных систем [1, с. 28].

В данной статье будет проанализирована перевозка парового котла высокого давления ZFR UNIVERSAL 23000 (рис. 1), выполняемая ввиду необходимости модернизации котельного оборудования на действующих месторождениях полезных ископаемых и освоения новых.

В настоящее время для перевозки котельного оборудования в труднодоступные регионы России могут использоваться основные логи-

стические решения в виде мультимодальных перевозок (комбинации железнодорожного, автомобильного, речного и авиационного транспорта). Кроме того, есть возможность подбора типа летательных аппаратов для транспортировки в определенные регионы [2, с. 35].

Применяемые в РКС виды транспорта представлены в табл. 1. Исходя из этого можно сделать вывод, что универсального решения не существует, выбор зависит от габаритов груза, бюджета проекта, срочности транспортировки, а также возникающих в процессе перевозки проблем, указанных в табл. 2. Для единичных поставок можно использовать специализированные автопоезда и зимники, а для крупных проектов – мультимодальные перевозки с применением двух и более перегрузок с возможностью сборки на месте (например, при обнаружении месторождений полезных ископаемых).

Материалы и методы исследования

Перевозка грузов в РКС требует учета многих факторов – от климатических до нормативных. Существует множество вариаций логистических схем, которые зависят от характеристик груза, а наибольшую эффективность для негабаритных перевозок демонстрируют мультимодальные перевозки по морю и зимникам.

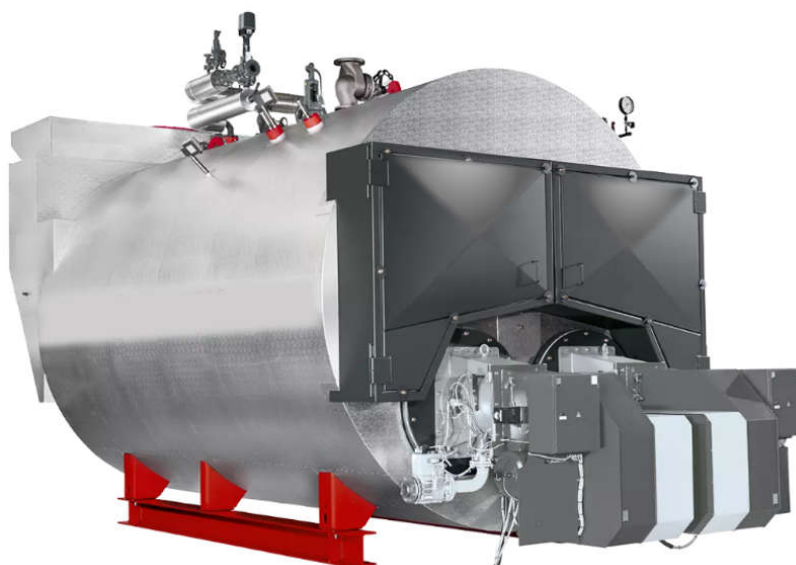


Рис. 1. Паровой котел ZFR UNIVERSAL 23000

Таблица 1

Действующие в РКС виды транспорта

Тип транспорта	Преимущества	Недостатки
Морской	Низкая стоимость при больших объемах	Краткосрочное окно для транспортировки (с июля по сентябрь)
Речной	Доступность в глубинных районах	Риск задержек из-за мелководья
Автомобильный	Гибкость маршрутов	Зависимость от погодных условий и низкая проходимость (10–30 км/ч)
Авиационный	Быстрота транспортировки	Высокая стоимость и зависимость от погодных условий
Железнодорожный	Стабильность (при наличии железнодорожных веток)	Ограниченная сеть (до ст. НБ)

Таблица 2

Ключевые проблемы и типовые логистические решения

Проблема	Решение
Короткий сезон навигации	Планирование поставок в зимнее время года (по зимникам) или летом по морским путям
Отсутствие дорожного покрытия	Использование вездеходов и гусеничной техники
Риск порчи груза в связи с климатическими условиями	Упаковка для северных перевозок (деревянный каркас с термоизоляцией), страхование груза и ответственности перевозчика
Высокая стоимость транспортировки	Консолидация грузов и долгосрочные контракты с перевозчиками

Разница в логистических подходах обусловлена не только стоимостью грузов, а еще и критичностью для бизнес-процессов, но современные технологии и разработки позволяют находить оптимальные решения, которые сводят риски и издержки к минимуму. При этом инновационные технологии стремительно развиваются и предлагают новые инструменты для решения сложных логистических задач [3, с. 25].

Транспортное обеспечение в арктических регионах демонстрирует устойчивый прогресс, интегрируя:

- устоявшиеся, проверенные практикой подходы;
- передовые технологические разработки;

– специфические, уникальные решения, разработанные на местах.

Данная область деятельности остается одной из наиболее трудных и захватывающих в глобальной транспортной индустрии, постоянно ставя перед специалистами в области логистики и инженерии новые задачи [4, с. 97].

Перевезти негабаритный груз из города *Н* в село *Б* можно разными способами. Можно использовать разные виды транспорта, но все способы перевозки напрямую зависят от времени года и погодных условий. На рис. 2 представлена схема унимодальной (только автомобильным транспортом) и мультимодальных перевозок.

Данная схема логистических решений свидетельствует о том, что существует множество

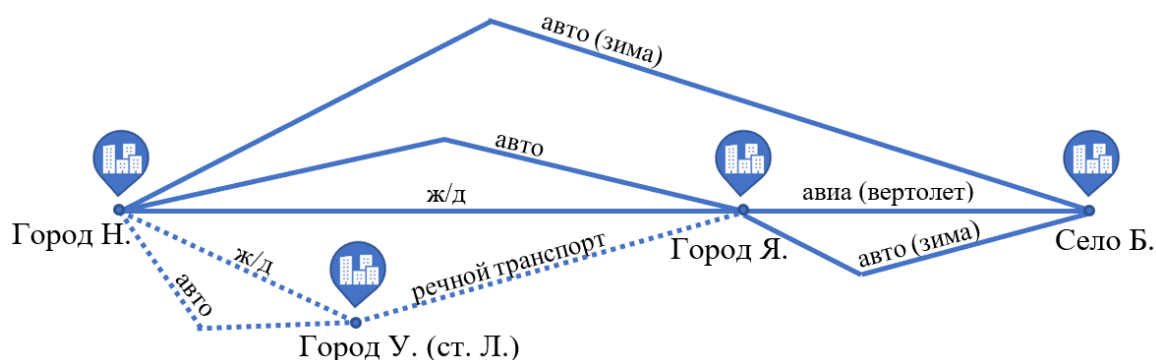


Рис. 2. Схема логистических решений по перевозке котельного оборудования

вариантов транспортировки груза, но оптимальный выбирается исходя из времени года перевозки, общей стоимости затрат и сроков доставки [5, с. 22].

Ориентируясь на разработанную схему логистических решений по перевозке котельного оборудования (см. рис. 2), можно разделить варианты перевозок на летний и зимний, а также разобрать каждый вариант и его особенности [5].

Первым вариантом транспортировки является унимодальная автомобильная перевозка из города *Н* непосредственно до села *Б*, без перевалок; данную перевозку возможно осуществить исключительно в зимнее время года, в период с декабря по начало февраля, когда автозимник Топ – Ток действует для безопасного проезда.

Второй вариант транспортировки – мультимодальная перевозка, которая включает в себя автомобильный проезд из города *Н* до города *Я*, а затем вертолетную доставку из города *Я* до села *Б*. Данная перевозка возможна круглогодично, но предпочтительна в летнее время года, поскольку для авиaperезовки летом требуется проводить гораздо меньше мероприятий по защите груза от обморожения, а также по предотвращению рисков, связанных с аномальными погодными условиями (снежные бури, сильные морозы, ветра).

Третьей схемой транспортировки оборудования является железнодорожная доставка из города *Н* до города *Я* с последующей вертолетной доставкой до конечного пункта в селе *Б*; данный способ можно применять круглогодично, но предпочтительнее летом.

Четвертый вариант – железнодорожная перевозка из города *Н* до города *Я*, а затем перевалка на автомобиль для дальнейшей транспортировки по автозимнику. Данный способ применим исключительно в зимнее время года.

Пятый вариант транспортировки включает в себя железнодорожную доставку до города *У* (ст. *Л*) с перевалкой на речной транспорт для перевозки в город *Я* с последующей вертолетной доставкой до села *Б*. Данный вариант возможен только летом из-за действующего периода навигации для речного транспорта.

Шестой вариант транспортировки представляет собой автомобильную доставку до города *У* с перевалкой на речной транспорт для перевозки в город *Я* с последующей вер-

толетной доставкой до села *Б*. Данный вариант также возможен только в летнее время года из-за ограниченного периода навигации для речного транспорта [6, с. 31].

Для дальнейшего анализа доставки котельного оборудования с помощью АС ЭТРАН НП были рассчитаны стоимость провозной платы, сроки перевозки и тарифная ставка по железной дороге. Согласно схемам перевозки существует только два варианта повагонной железнодорожной перевозки: 1) *НЮ – НБ*; 2) *НЮ – Л*.

В качестве железнодорожного подвижного состава был выбран 4-осный транспортер, грузом является «ЕТСНГ 351397 Оборудование энергетическое и запасные части к нему», отправка повагонная, класс груза – 3, принадлежность вагона – собственный, индекс негабаритности – Н0510, номер тарифной схемы – 41 (так как груз имеет 5 нижнюю и 5 боковую негабаритность).

Согласно первому варианту стоимость перевозки составила 7 511 904,00 р., в том числе НДС 20 %. Расчетный срок доставки, определенный АС ЭТРАН НП, равен 64 сут (14.06.2025 – 17.08.2025) по маршруту *НЮ* (850505) – *НБ* (913403), расстояние маршрута транспортировки 4 564 км.

Согласно второму варианту стоимость перевозки составила 3 419 599,20 р., в том числе НДС 20 %. Расчетный срок доставки, определенный АС ЭТРАН НП, равен 27 сут (14.06.2025 – 11.07.2025) по маршруту *НЮ* (850505) – *Л* (927209), расстояние маршрута транспортировки 1 908 км.

Далее был рассчитан тариф на автомобильную транспортировку котельного оборудования из города *Н* в село *Б* (через город *Я*), тариф негабаритных грузов на трале составил около 1 143 560 р. (без учета крепления, сопровождения, ППР и т. д.).

После чего необходимо было произвести расчет автомобильной перевозки из города *Н* в город *У* для дальнейшей перевалки на речной транспорт, тариф негабаритных грузов на трале составил около 427 800 р. (без учета крепления, сопровождения, ППР и т. д.) [7, с. 80].

Затем была рассчитана стоимость доставки по автозимнику из города *Я* до села *Б*. На основе данных тарифов был определен ориентировочный тариф на негабаритный груз. Примерная протяженность зимника составляет около 1 300 км, следовательно, основываясь на рассто-

янии по зимнику и по трассе и учитывая габариты котельного оборудования (увеличение тарифа на ~25 %), тариф составил индикативно 1 400 000 р. без учета ПРР, сопровождения, средств крепления [8, с. 19].

Далее произведен расчет тарифа на перевозку котельного оборудования по реке *Л* от порта *У-К* до порта *Я*, расстояние маршрута транспортировки составило около 1 450 км. Расчет производился согласно прейскуранту 14-01 «Тарифы на перевозки грузов и буксировку плотов речным транспортом» [9, с. 70] с учетом коэффициента индексации к текущему уровню цен.

Для грузов категории «энергетическое оборудование» базовый тариф составляет 212 р./т и тарифная ставка вычисляется по формуле

$$T_c = B_t m, \quad (1)$$

где B_t – это базовый тариф для данной категории груза, р./т; m – масса груза, т.

Следовательно, для нашего груза базовый тариф составит:

$$T_c = 212 \cdot 12 = 2\,544 \text{ р.}$$

Коэффициент доплаты за негабаритный груз составляет 40 % от тарифной ставки, а также имеется региональный коэффициент для Вилюйского бассейна, равный 304,81 (что подходит для реки *Л*).

Расчет тарифа на речном транспорте будет производиться по формуле

$$T = T_c \cdot K_{н.г} \cdot K_p, \quad (2)$$

где T_c – тарифная ставка, р.; $K_{н.г}$ – коэффициент доплаты за негабаритный груз; K_p – региональный коэффициент.

Расчет итогового тарифа по речному транспорту:

$$T = 2\,544 \cdot 1,4 \cdot 304,81 = 1\,213\,632 \text{ р.}$$

Таким образом, стоимость речной транспортировки котельного оборудования по маршруту *У–Я* составила 1 213 632 р. с учетом регионального коэффициента и негабаритности.

Далее была рассчитана стоимость вертолетной доставки из города *Я* в село *Б*. Стоимость летного часа вертолета Ми-26Т2 равна 600 000 р. в 2016 г. С учетом инфляции и роста цен на топливо стоимость летного часа составила ~1 400 000 р. (без учета ПРР и средств крепления) [10, с. 11].

Расчет авиатарифа производится следующим образом:

$$T = C_{л.ч} \left(\left(\frac{V_{кр} K_1}{L} \right) + \left(\frac{V_{кр} K_2}{L} \right) + 1 \right), \quad (3)$$

где $C_{л.ч}$ – стоимость летного часа, р./ч; $V_{кр}$ – крейсерская скорость вертолета Ми-26Т2, км/ч; K_1 – коэффициент, учитывающий поправки в скорости полета из-за взлета и посадки при транспортировке груза (0,78); K_2 – коэффициент, учитывающий поправки в скорости полета из-за взлета и посадки при порожнем возврате (0,92); 1 – дополнительный час на ПРР.

Расчет тарифа на вертолетную доставку:

$$T = 1\,400\,000 \cdot \left(\left(\frac{255 \cdot 0,78}{470} \right) + \left(\frac{255 \cdot 0,92}{470} \right) + 1 \right) = 2\,691\,277 \text{ р.}$$

Таким образом, стоимость вертолетной транспортировки котельного оборудования по маршруту *Я–Б* составила 2 691 277 р. с учетом стоимости летного часа и длительности ПРР.

В качестве метода сравнительного анализа доставки котельного оборудования был принят графический, поскольку он позволяет наглядно продемонстрировать преимущества и недостатки каждой схемы мультимодальной перевозки и выявить наиболее подходящие варианты транспортировки для грузоотправителей в зависимости от затрат на перевозку, включая погрузочно-разгрузочные работы, транспортные тарифы, стоимость аренды / технического рейса и средств крепления, сроков доставки и периода перевозки. Для начала необходимо скомпоновать все данные, которые были рассчитаны в процессе исследования. Итоговые данные по схемам перевозки представлены в табл. 3.

Далее была разработана диаграмма, которая показывает наглядное сравнение сроков доставки и затрат на перевозку (рис. 3). Исходя из данных диаграммы можно сделать вывод, что самым дешевым вариантом мультимодальной перевозки является первая схема унимодальной автомобильной перевозки со сроком доставки 6 сут и затратами 3 млн р., самым дорогим – третья схема, которая включает в себя железнодорожную перевозку из города *Н* в город *Я* и вертолетную доставку в село *Б* со сроком доставки 65 сут и затратами 10,92 млн р.

Результаты исследования

По скорости доставки (5 сут) лидирует вторая схема, предполагающая автоперевозку из города *Н* в город *Я* и вертолетную доставку в село *Б*. Самый медленный вариант (66 сут) – четвертая схема перевозки, включающая

Таблица 3

Данные по схемам мультимодальных перевозок

Схема	Маршрут	Срок доставки, сут	Затраты, млн р.	Период перевозки
1	$H - B$ (авто)	6	3,00	Зима
2	$H - Я$ (авто), $Я - B$ (авиа)	5	4,60	Круглогодно
3	$H - Я$ (ж.-д.), $Я - B$ (авиа)	65	10,92	
4	$H - Я$ (ж.-д.), $Я - B$ (авто)	66	9,16	Зима
5	$H - У$ (ж.-д.), $У - Я$ (речной), $Я - B$ (авиа)	36	8,10	Лето
6	$H - У$ (авто), $У - Я$ (речной), $Я - B$ (авиа)	11	5,64	

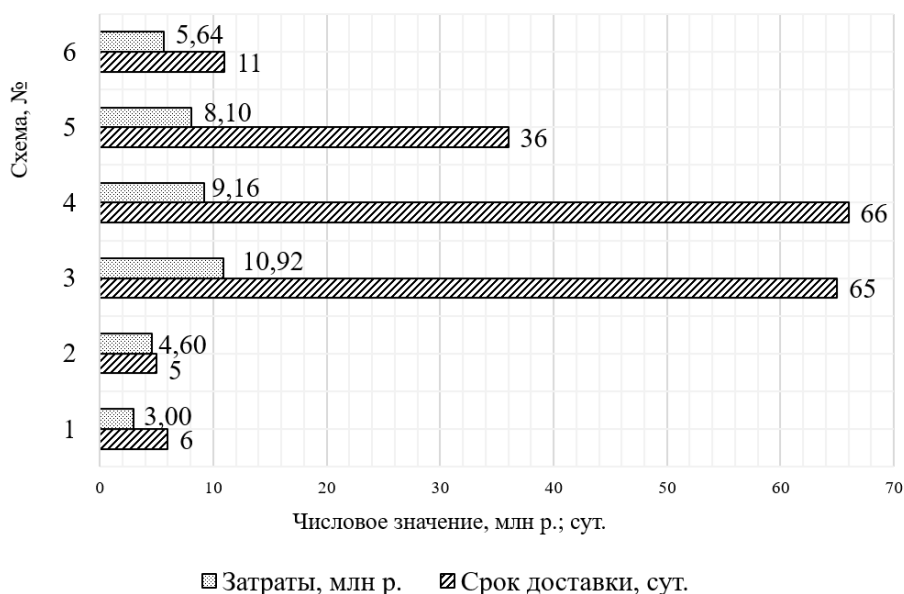


Рис. 3. Сравнительный графический анализ мультимодальных схем доставки

железнодорожную перевозку из города H в город $Я$ и автомобильную доставку до села B .

Самыми универсальными вариантами доставки являются вторая и третья схемы, поскольку позволяют осуществлять перевозку круглогодно. Из них вторая самая экономически выгодная.

Подводя итоги сравнительного анализа, можно сделать вывод:

- самая экономически выгодная — 1-я схема;
- самая экономически невыгодная — 3-я схема;
- самая быстрая — 2-я схема;
- самая медленная — 4-я схема;
- самые универсальные — 2-я и 3-я схемы (2-я самая выгодная из мультимодальных).

Для грузоотправителей крайне важна стоимость затрат на перевозку, поэтому стоит выбрать первую схему перевозки, но недостатком данного варианта является ограниченный период возможности транспортировки — зимний,

поэтому необходимо иметь данный факт в виду при принятии транспортно-логистических решений по перевозке такого типа груза в северном направлении. Данная схема идеально подходит при потребностях перевозки только в зимнее время года. Если же планируются регулярные перевозки, по несколько раз в год и в разное время года, необходимо использовать вторую схему мультимодальных перевозок, которая позволяет осуществлять перевозки в любое время года, а еще является самой экономически выгодной среди круглогодичных схем перевозки и самой быстрой среди всех представленных вариантов. Остальные схемы экономически не эффективны и сильно проигрывают по срокам доставки [11, с. 70].

На основании проведенного сравнительного анализа схем доставки можно выделить следующие ключевые риски и предложить меры по их минимизации.

Риски, связанные с сезонностью перевозки (схема 1):

- возможность применения схемы только в зимний период;
- возможный дефицит подвижного состава в данном направлении.

Минимизировать их можно путем разработки графика перевозок с учетом сезонного фактора и заблаговременного бронирования подвижного состава [12, с. 95].

Зависимость от погодных условий (схема 2):

- риск задержек из-за сложных погодных условий;
- экстремальные температурные колебания.

Минимизация заключается в использовании данных мониторинга метеопрогнозов и заключении договоров с альтернативными перевозчиками [13, с. 36].

Технологические и инфраструктурные риски:

- риск дефицита авиатранспорта в пиковые сезоны;
- отсутствие перевалочных мощностей в городе *А*, селе *Б*.

Можно осуществлять предварительное бронирование за 6 мес. до перевозки и арендовать резервные складские помещения при уверенности в намерениях клиента.

Организационные и кадровые риски:

- дефицит квалифицированных водителей;
- сбои при перевалке груза с одного вида транспорта на другой.

Минимизация заключается в предварительной подготовке кадрового резерва водителей и привлечении экспедитора, ответственного за все виды транспорта, входящие в перевозку.

Риски сохранности груза:

- риск краж и хищения в пути;
- повреждение груза при вертолетной транспортировке;
- риск порчи груза при перевалке.

Снизить данные риски возможно при организации фото- и видеофиксации при погрузочно-разгрузочных работах, а также путем страхования груза.

Итак, с целью минимизации всех рисков для выбранных в результате анализа схем необходимо заранее бронировать подвижной состав, нанимать проверенного экспедитора, ответственного за весь процесс перевозки, подготавливать резервные складские помещения при пиковых загруженностях, выполнять мониторинг метеопрогноза (погодных условий), заранее прорабатывать логистические маршруты и запрашивать фото- и видеофиксацию погрузочно-разгрузочных процессов.

Выводы

Таким образом, проведенный анализ перевозки дополняет исследования в области логистики негабаритных грузов в экстремальных условиях, предлагая новый метод расчетов и анализа. Результаты могут использоваться логистическими компаниями, грузоотправителями и органами власти для планирования перевозок и развития транспортной инфраструктуры. Выполненная работа демонстрирует высокую эффективность предложенных решений для доставки крупногабаритного оборудования в северном направлении, а именно: экономическую (оптимизация затрат и сроков доставки снижает общие логистические издержки для компаний в удаленных регионах), социальную (результаты работы способствуют инфраструктурному развитию РКС, обеспечивая доставку критически важного оборудования для промышленности и энергетики), безопасность (разработанные регламенты крепления грузов и сопровождения перевозок снижают риски повреждения оборудования и аварий). Полученные результаты обладают значительной практической ценностью и могут быть внедрены в деятельность логистических компаний и промышленных предприятий, способствуя развитию удаленных регионов России.

Список источников

1. Акельев А. С., Король Р. Г. Критерии оценки уровня развития терминально-логистических объектов железнодорожного транспорта // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 2 (74). С. 24–31.
2. Эсаулов В. А., Давыдов Б. И., Мединцев Е. В. Рациональное распределение перевозок на основе решения транспортной задачи линейного программирования // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 1 (68). С. 33–40.
3. Гришкова Д. Ю. Перспективы и преимущества контрейлерных перевозок // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2023. № 4 (11). С. 18–26.

4. Ольховиков С. Э., Петренева Е. А. Организация опорного мультимодального транспортно-логистического центра в Дальневосточном федеральном округе // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2025. № 1 (42). С. 95–102.
5. 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.
6. Шерстобитова О. Б., Псеровская Е. Д., Басманов Д. А. Имитационное моделирование при развитии контейнерных перевозок // Железнодорожный транспорт. 2024. № 7. С. 30–32.
7. Ольховиков С. Э., Петренева Е. А. Проблемы логистики и хранения зерновых грузов и пути их решения // Вестник транспорта Поволжья. 2023. № 6 (102). С. 78–86.
8. Гладунов В. А., Бондаренко Е. М. Выбор оптимальных логистических схем поставок товаров из Китая в Российскую Федерацию при использовании контейнеров // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 1 (64). С. 15–23.
9. Ольховиков С. Э., Петренева Е. А. Перспективные направления логистических цепей поставок грузов на восток // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2025. № 2 (17). С. 66–74.
10. Речкин М. К., Нехорошков В. П. Северо-Сибирская железнодорожная магистраль: современное состояние и перспективы развития // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2025. № 1 (16). С. 5–16.
11. Гrefenshteyn А. П. Обоснование целесообразности создания распределительного центра в условиях взаимодействия разных видов транспорта // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 1 (60). С. 68–75.
12. Хабаров В. И., Квашнин В. Е. Мультиагентные системы маршрутизации при организации городских перевозок // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 2 (74). С. 94–102.
13. Буровцев В. В., Парыгина Д. В. Основные тенденции новейшей истории развития рынка транспортных услуг в России // Вопросы новой экономики. 2024. № 2 (70). С. 34–39.

References

1. Akeliev A. S., Korol R. G. Criteria for assessing the development level of railway terminal and logistics facilities. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(74):24–31. (In Russ.).
2. Esaulov V. A., Davydov B. I., Medintsev E. V. Increasing the volume of cargo transportation due to rational distribution of volumes among loading stations. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(68):33–40. (In Russ.).
3. Grishkova D. Yu. Prospects and advantages of piggyback transportation. *Fundamental and Applied Transport Issues*. 2023;(11):18–26. (In Russ.).
4. Olkhovikov S. E., Petrenева E. A. Organization of a supporting multimodal transport and logistics center in the Far Eastern Federal District. *Transport of the Asia-Pacific Region*. 2025;(42):95–102. (In Russ.).
5. Khabarov V. I., Bekov M. A., Kvashnin V. E. Critical objects of transportation infrastructure in megacities and agglomerations. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(70):20–27. (In Russ.).
6. Sherstobitova O. B., Pserovskaya E. D., Basmanov D. A. Simulation modeling in the development of container transportation. *Railway Transport*. 2024;(7):30–32. (In Russ.).
7. Olkhovikov S. E., Petrenева E. A. Problems with logistics and storage of grain cargo and their solutions. *Vestnik transporta Povolzhya*. 2023;(102):78–86. (In Russ.).
8. Gladunov V. A., Bondarenko E. M. The choice of optimal logistics schemes for the supply of goods from China to the Russian Federation using containers. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(64):15–23. (In Russ.).
9. Olkhovikov S. E., Petrenева E. A. Promising directions of logistics supply chains for goods to the east. *Fundamental and Applied Transport Issues*. 2025;(17):66–74. (In Russ.).
10. Rechkin M. K., Nekhoroshkov V. P. The North Siberian railway: the current state and prospects of development. *Fundamental and Applied Transport Issues*. 2025;(16):5–16. (In Russ.).
11. Grefenshteyn A. P. Justification of urban consolidation centre expediency with interaction transport modes. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(60):68–75. (In Russ.).
12. Khabarov V. I., Kvashnin V. E. Multi-agent routing systems in urban transport management. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(74):94–102. (In Russ.).
13. Burovcev V. V., Parygina D. V. The main trends of recent history of transport service market development in Russia. *Issues of New Economy*. 2024;(70):34–39. (In Russ.).

Информация об авторах

С. Э. Ольховиков – кандидат экономических наук, доцент кафедры «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Е. А. Петренева – старший преподаватель кафедры «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

S. E. Olkhovikov – Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Logistics, Commercial Work and Rolling Stock Department, Siberian Transport University.

E. A. Petreneva – Senior Lecturer of the Logistics, Commercial Work and Rolling Stock Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 29.10.2025; одобрена после рецензирования 29.12.2025; принята к публикации 18.02.2026.

The article was submitted 29.10.2025; approved after reviewing 29.12.2025; accepted for publication 18.02.2026.

Научная статья
УДК 624.139
doi:10.52170/1815-9265_2026_78_56

Влияние коэффициента теплообмена охлаждающих устройств на термостабилизацию основания земляного полотна транспортных сооружений

Денис Алексеевич Разуваев^{1✉}, Егор Игоревич Нагаев²

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

¹ razdenis@mail.ru✉

² einagaev@mail.ru

Аннотация. В работе обосновывается применение коэффициента теплообмена охлаждающих устройств в качестве основного критерия проектирования систем термостабилизации основания земляного полотна транспортных сооружений в криолитозоне.

Для оценки влияния коэффициента теплообмена охлаждающих устройств на термостабилизацию основания земляного полотна выполнено численное моделирование эксплуатируемого в Арктической зоне участка железнодорожной насыпи на перегоне Чум – Лабытнанги. Для составления и последующей верификации численной модели эксплуатируемой железнодорожной насыпи собраны необходимые инженерно-геологические и теплотехнические данные и проведен мониторинг температурного режима системы «насыпь – основание» в годовом цикле. На составленной и верифицированной модели проведено исследование влияния коэффициента теплообмена охлаждающих устройств на термостабилизацию основания рассмотренной насыпи. По результатам численного моделирования определены зависимости времени термостабилизации основания от коэффициента теплообмена при многолетней термостабилизации и за один холодный период года.

На основании выполненных исследований сформулирован принцип проектирования охлаждающих устройств для термостабилизации оснований эксплуатируемых насыпей в криолитозоне, который позволяет определить требуемый коэффициент теплообмена, обеспечивающий проектные сроки термостабилизации и снижение величины морозного пучения транспортных сооружений до предельно допустимых значений.

По результатам проведенных исследований отмечено, что в некоторых случаях могут потребоваться решения по термостабилизации, обеспечивающие коэффициент теплообмена, превышающий возможности существующих сезонно действующих охлаждающих устройств. В таких случаях актуальны исследования, направленные на разработку и эффективное применение решений, основанных на ускоренных или комбинированных способах термостабилизации, способных обеспечить более высокие итоговые значения коэффициента теплообмена между основанием земляного полотна и атмосферой.

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

Для цитирования: Разуваев Д. А., Нагаев Е. И. Влияние коэффициента теплообмена охлаждающих устройств на термостабилизацию основания земляного полотна транспортных сооружений // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 1 (78). С. 56–65. DOI 10.52170/1815-9265_2026_78_56.

Original article

Influence of the heat transfer coefficient of cooling devices on the thermal stabilization of railway subgrade foundations

Denis A. Razuvaev^{1✉}, Egor I. Nagaev²

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

¹ razdenis@mail.ru✉

² einagaev@mail.ru

Abstract. The paper substantiates the use of the heat transfer coefficient of cooling devices as the main criterion for designing thermal stabilization systems for the foundation of the roadbed of transport structures in the cryolithic zone.

To assess the influence of the heat transfer coefficient of cooling devices on the thermal stabilization of the roadbed base, numerical modeling was performed for a section of the railway embankment on the Chum-Labytnangi

section operated in the Arctic zone. To compile and subsequently verify a numerical model of the railway embankment in operation, the necessary engineering-geological and thermal engineering data were collected and the temperature regime of the "embankment – foundation" system was monitored in an annual cycle. The compiled and verified model was used to study the influence of the heat exchange coefficient of cooling devices on the thermal stabilization of the base of the embankment under consideration. Based on the results of numerical modeling, the dependences of the time of thermal stabilization of the foundation on the heat transfer coefficient during long-term thermal stabilization and for one cold period of the year were determined.

Based on the completed research, a design principle for cooling devices for thermal stabilization of the foundations of exploited embankments in the cryolithic zone was formulated. The principle allows one to determine the required heat exchange coefficient, ensuring the design timeframe for thermal stabilization and reducing the amount of frost heaving of transport structures to the maximum permissible values.

Based on the results of the conducted research, it was noted that in some cases thermal stabilization solutions may be required that provide a heat transfer coefficient exceeding the capabilities of existing seasonally operating cooling devices. In such cases, research is relevant aimed at developing and effectively implementing solutions based on accelerated or combined thermal stabilization methods, capable of providing higher final values of the heat exchange coefficient between the subgrade and the atmosphere.

Keywords: railway embankment, foundation soils, permafrost soils, soil thermal stabilization, seasonal cooling devices, heat transfer

For citation: Razuvaev D. A., Nagaev E. I. Influence of the heat transfer coefficient of cooling devices on the thermal stabilization of railway subgrade foundations. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(78):56–65. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_78_56.

Введение

Эксплуатация земляного полотна транспортных сооружений в криолитозоне сопряжена с многочисленными деформациями насыпей, вызванными деградацией многолетне-мерзлых грунтов (ММГ) [1–3]. Такие деформации приводят к постоянным ремонтно-восстановительным работам, введению ограничений скоростей движения транспорта и существенному росту эксплуатационных затрат. Данная проблема актуальна не только для России, но и для других стран с распространением ММГ в основании земляного полотна транспортных сооружений [4, 5].

Для решения проблемы деградации ММГ при строительстве и эксплуатации транспортных сооружений в криолитозоне применяется широкий спектр методов термостабилизации [6–8]. Главные принципы классификации этих методов были сформулированы А. А. Цернантом, который выделил основные группы способов управления тепловым режимом грунтового массива при проектировании земляного полотна на транспортных сооружениях [9].

Особое место среди методов термостабилизации занимают охлаждающие колонки с различным принципом действия, в том числе сезонно действующие охлаждающие устройства (СОУ). За последние десятилетия СОУ, главным образом парожидкостного типа, получили широкое применение при строительстве и эксплуатации транспортных и промышленных сооружений в криолитозоне и продемонстрировали высокую эффективность в обеспечении устойчивости ММГ основания.

Как отмечается в работах [10–12], такие устройства способны интенсивно отводить тепло из грунтового массива в холодный период года, способствуя не только сохранению, но и восстановлению мерзлого состояния грунтов основания.

Несмотря на разнообразие перечисленных охлаждающих устройств для термостабилизации, их действие может быть описано единым физическим принципом, а именно повышением интенсивности отведения тепла из грунтового массива за счет улучшения условий теплообмена между основанием земляного полотна и атмосферой. Параметром, характеризующим работу термостабилизирующего устройства, выступает коэффициент теплообмена α , Вт/(м²·К), который количественно описывает интенсивность этого взаимодействия [12, 13]. Коэффициент теплообмена представляет собой результирующий параметр, зависящий от совокупности конструктивных и эксплуатационных факторов. Например, для СОУ коэффициент теплообмена определяется геометрическими размерами конденсаторной части, характером ее оребрения, скоростью и температурой окружающего воздуха, а также термическим сопротивлением на границе грунта и стенки испарителя. Кроме того, на эффективность теплоотвода существенно влияет время выхода устройства в рабочий режим. Как правило, для широко применяемых СОУ его значение варьируется пределах от 2 до 10 Вт/(м²·К) [14–16].

Таким образом, коэффициент теплообмена выступает параметром, определяющим

интенсивность отвода тепла из грунтового массива и, следовательно, эффективность термостабилизации основания земляного полотна. В связи с этим коэффициент теплообмена может быть принят в качестве основного критерия проектирования систем термостабилизации. Подбор величины коэффициента теплообмена охлаждающих устройств под конкретные мерзлотно-грунтовые и климатические условия позволяет регулировать скорость термостабилизации, а следовательно, и сроки восстановления положения границы ММГ в основании земляного полотна. При этом скорость термостабилизации напрямую влияет на величину морозного пучения грунтов основания и сооружения в целом, возникающего при восстановлении ММГ [16–18].

Для оценки влияния коэффициента теплообмена охлаждающих устройств на термостабилизацию основания земляного полотна в настоящей работе выполнено численное моде-

лирование для участка эксплуатируемой в Арктической зоне насыпи железной дороги.

Методы исследования

Для численного моделирования термостабилизации основания железнодорожной насыпи авторами выбран перегон Чум – Лабытнанги. Выполненное визуальное обследование однопутного участка на 167 км перегона установило наличие характерных криогенных деформаций железнодорожного пути (рис. 1).

Для составления и последующей верификации численной модели эксплуатируемой железнодорожной насыпи авторами собраны необходимые инженерно-геологические и теплотехнические данные и проведен мониторинг температурного режима системы «насыпь – основание» в годовом цикле (рис. 2).

Мониторинг температурного поля проведен по термометрическим скважинам, установленным по бровкам земляного полотна,

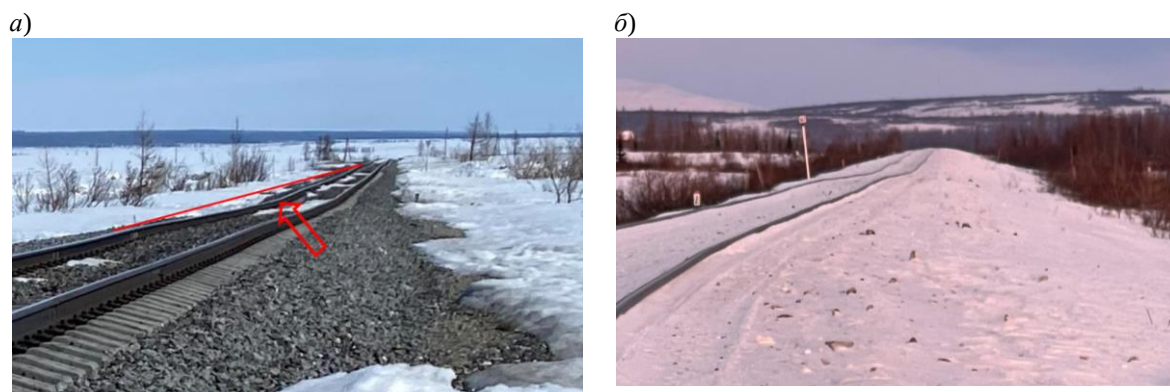


Рис. 1. Характерные деформации участка железной дороги на 167 км перегона Чум – Лабытнанги: а – термопросадка железнодорожного пути из-за деградации ММГ; б – пучины железнодорожного пути из-за сезонного промерзания грунтов основания

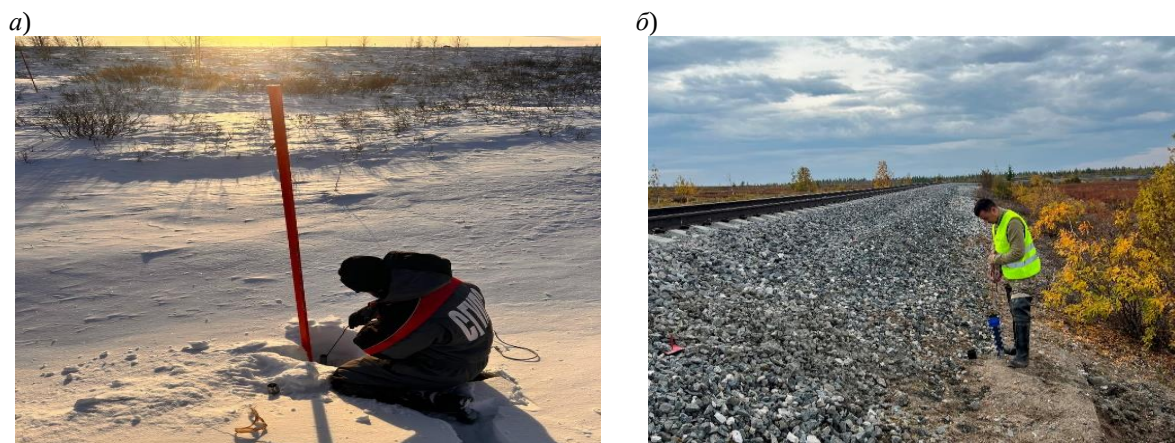


Рис. 2. Процесс измерения температур грунтов основания в ходе проведения геокриологического мониторинга участка железной дороги на 167 км перегона Чум – Лабытнанги: а – в холодный период года; б – в теплый период года

у подошвы откосов насыпи и на удалении 25 м от основания насыпи. Для фиксации температуры грунтов использовалась термометрическая коса с переносным контроллером с абсолютной погрешностью измерений не более $\pm 0,1$ °С. Датчики температуры на косе располагались с интервалами 0,5 м до глубины 5 м и 1,0 м на глубине от 5 до 10 м.

Для решения поставленной задачи была составлена численная геокриологическая модель системы «насыпь – основание». Модель создана в программном комплексе Frost 3D (модуль «Frost.Термо») с учетом теплофизических свойств грунтов, установленных по результатам обследования, и учитывает литологическую неоднородность грунтового массива, глубину залегания многолетне-мерзлых грунтов и уровень грунтовых вод.

С целью воспроизведения реальных условий формирования температурного поля для начальных и граничных условий задавались данные с ближайшей метеорологической станции: температура воздуха, толщина и плотность снежного покрова, продолжительность светового дня, скорость ветра. Температурный режим многолетне-мерзлых и сезонно-мерзлых грунтов определялся по результатам прямых замеров в термометрических скважинах. В качестве исходных данных использовались фактические значения температуры грунтов на момент начала моделирования.

Проверка адекватности составленной численной модели выполнена по результатам сравнения расчетного температурного поля (температуры t_p), полученного по результатам моделирования на 1 год, с данными годового геокриологического мониторинга (температуры t_m) участка железной дороги на 167 км перегона Чум – Лабытнанги. Сравнение результатов численного моделирования с данными натурного мониторинга за период с сентября 2024 г. по сентябрь 2025 г. представлено в таблице.

Анализ таблицы позволяет сделать вывод, что отличия расчетных температур системы «насыпь – основание» (t_p), полученных по результатам моделирования на 1 год, от данных мониторинга (t_m) не превышают инструментальной погрешности измерительных приборов, регламентируемой п. 3.6 ГОСТ 25358–2020. Это указывает на корректность составления численной модели и назначения граничных условий.

В условиях нарушения естественного теплообмена основания насыпи и атмосферы за счет метелевого снегопереноса и снеговых отложений на откосах, без применения специальных мер термостабилизации на исследуемом участке наблюдается постепенное повышение температуры грунтового массива. В этом случае, как показывают результаты моделирования, возможно формирование таликовых зон и увеличение глубины сезонного протаивания, что создает предпосылки для развития неравно-

**Сравнение результатов моделирования расчетного температурного поля
с данными годового геокриологического мониторинга**

Глубина, м	Значения температур, °С, по скважинам											
	1		2		3		4		5		6	
	t_m	t_p	t_m	t_p	t_m	t_p	t_m	t_p	t_m	t_p	t_m	t_p
0,5	13,0	13,30	12,5	12,40	12,6	12,60	11,6	11,74	12,3	12,20	13,1	12,80
1,0	12,2	12,02	12,3	11,95	13,0	12,96	8,5	8,59	12,6	12,66	9,4	9,30
1,5	11,4	11,34	12,0	12,00	11,5	11,65	3,6	3,76	12,2	12,25	4,2	4,40
2,0	10,9	10,94	11,3	11,22	13,8	14,06	0,1	0,01	13,0	13,16	0,0	0,03
2,5	10,4	10,44	10,6	10,53	11,3	11,10	–0,1	–0,16	12,2	12,20	0,0	–0,02
3,0	7,4	7,18	6,8	6,75	11,6	11,90	–0,1	–0,02	11,8	12,10	–0,1	–0,04
3,5	4,3	4,51	3,1	3,26	7,1	7,16	–0,2	–0,08	7,2	7,36	–0,1	–0,11
4,0	2,7	2,66	2,2	2,29	4,2	4,03	–0,2	–0,34	4,5	4,63	–0,1	–0,14
4,5	1,0	0,90	1,3	1,21	3,5	3,53	–0,3	–0,42	2,8	2,73	–0,4	–0,41
5,0	0,6	0,53	0,8	0,94	2,2	2,09	–0,4	–0,39	1,6	1,59	–0,5	–0,49
6,0	0,3	0,25	0,4	0,37	1,5	1,55	–0,4	–0,44	1,0	0,95	–0,4	–0,25
7,0	0,1	0,22	0,2	0,15	1,1	1,10	–0,5	–0,54	0,4	0,50	–0,6	–0,48
8,0	0,2	0,29	0,1	0,12	1,5	1,60	–0,7	–0,75	0,3	0,15	–0,6	–0,74
9,0	–0,1	–0,04	–	–	0,4	0,45	–0,7	–0,81	0,2	0,26	–0,8	–0,90
10,0	–	–	–	–	0,1	0,10	–0,8	–0,69	–0,1	–0,02	–0,8	–0,86

Примечание. Скважины 1 и 2 располагались на обочине земляного полотна, 3 и 5 – у подошвы насыпи, 4 и 6 – в полосе отвода, на расстоянии 25 м от подошвы насыпи.

мерных просадок и снижения надежности сооружения (подтверждается результатами визуального обследования).

После верификации численной геокриологической модели системы «насыпь – основание» она дополнена сезонно действующими охлаждающими устройствами (рис. 3).

Расстановка СОУ выполнена по схеме с тремя продольными рядами на каждый откос. Шаг расстановки принят минимальным из практики термостабилизации земляного полотна. Для термостабилизации основания эксплуатируемой насыпи применены как вертикальные, так и наклонные охлаждающие устройства с погружением до границы многолетне-мерзлых грунтов. В качестве основного решения приняты СОУ парожидкостного типа.

Описание работы СОУ в программном комплексе выполнено путем присвоения внутренним блокам граничного условия III рода с приведением среднемесячных температур воздуха на поверхности и коэффициента теплообмена. Длина испарительной части СОУ

принята 12 м, что обеспечивает заглубление до уровня границы многолетне-мерзлых грунтов. Конденсаторная часть принята высотой 4 м и над поверхностью земли.

На составленной модели проведено исследование влияния коэффициента теплообмена охлаждающих устройств на термостабилизацию основания рассмотренной насыпи. Расчетом установлено, что при минимальном для СОУ коэффициенте теплообмена $\alpha = 2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ время термостабилизации T составит четыре года. Моделирование термостабилизации выполнялось с 1 сентября первого года расчетного периода. В качестве критерия завершения термостабилизации принято сохранение температуры под подошвой насыпи по оси пути, близкой к 0°C (температура окончания оттаивания глинистых грунтов), к 1 сентября последнего года расчетного периода.

На рис. 4 представлен результат распределения температур в системе «насыпь – основание» рассмотренного участка железной дороги при термостабилизации СОУ с коэффи-

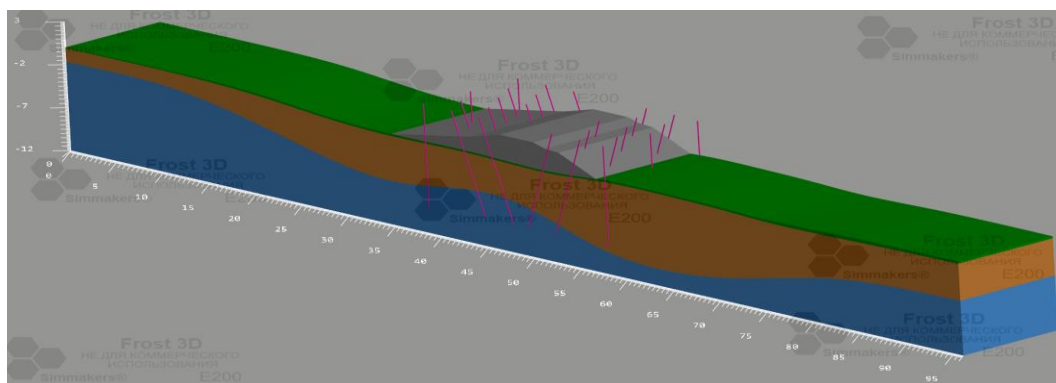


Рис. 3. Геокриологическая модель системы «насыпь – основание» с установленными СОУ в интерфейсе программного комплекса «Frost.Термо»

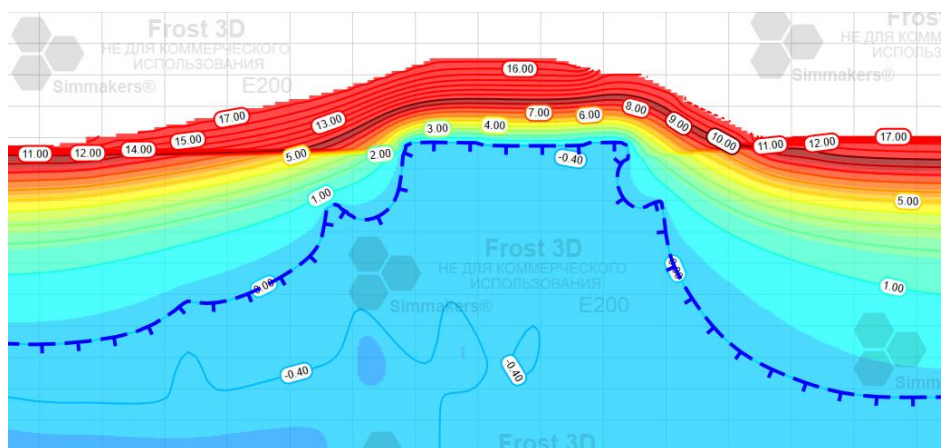


Рис. 4. Результат распределения температур в системе «насыпь – основание» по результатам моделирования с $\alpha = 2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ по истечении четырех лет

циентом теплообмена $\alpha = 2 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ в течение четырех лет.

Далее было проведено итерационное моделирование, в ходе которого коэффициент теплообмена α последовательно увеличивался и подбиралось такое значение параметра, при котором время термостабилизации T по описанному выше критерию составляло 3, 2 и 1 год. Отдельно выполнено моделирование термостабилизации за один холодный период года с подбором коэффициента теплообмена α для обеспечения времени T , равного 9, 6, и 3 мес. В этом случае критерием завершения термостабилизации принято достижение температуры $-0,6 \dots -1,0 \text{ }^\circ\text{C}$ (температура твердомерзлого состояния глинистых грунтов по ГОСТ 25100) под подошвой насыпи по оси пути.

По результатам численного моделирования для однопутного участка на 167 км перегона Чум – Лабытнанги определены зависимости времени термостабилизации T от коэффициента теплообмена α при многолетней термостабилизации (рис. 5, а) и за один холодный период года (см. рис. 5, б).

По мере увеличения коэффициента теплообмена охлаждающих устройств время термостабилизации предсказуемо сокращается, но с ослаблением тренда. Этот эффект наблюдается как при многолетней термостабилизации, так и при термостабилизации за один холодный период года.

При достижении определенного порога времени термостабилизации [для рассматриваемого участка железной дороги – около трех месяцев (см. рис. 5, б)] эффективность охлаждающих

устройств достигает предела, т. е. дальнейшее увеличение коэффициента теплообмена не приводит к значимому сокращению времени термостабилизации системы «насыпь – основание». Это можно объяснить тем, что при высоких значениях коэффициента теплообмена интенсивность отвода тепла из грунтового массива уже ограничивается не возможностями охлаждающих устройств, а температурой окружающей среды в холодный период года и грунтовыми условиями.

Существенное увеличение времени термостабилизации (см. рис. 5, а) при снижении коэффициента теплообмена до значений менее $4 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ обусловлено не только уменьшением интенсивности отвода тепла охлаждающим устройством, но и особенностями климатического цикла. При низких значениях коэффициента теплообмена за холодный период года СОУ не успевает существенно повысить положение кровли ММГ. С наступлением теплого сезона, когда устройство фактически прекращает работу, процесс деградации ММГ возобновляется, в результате чего достигнутый за зиму охлаждающий эффект ослабевает. При низких значениях коэффициента теплообмена СОУ количество теплых периодов года за время термостабилизации увеличивается, что приводит к значительной нелинейности в изменении времени термостабилизации (см. графики на рис. 5, а).

Анализ графиков, представленных на рис. 6, позволяет сделать вывод, что при реальных значениях коэффициента теплообмена для широко применяемых СОУ (до $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ [14–16])

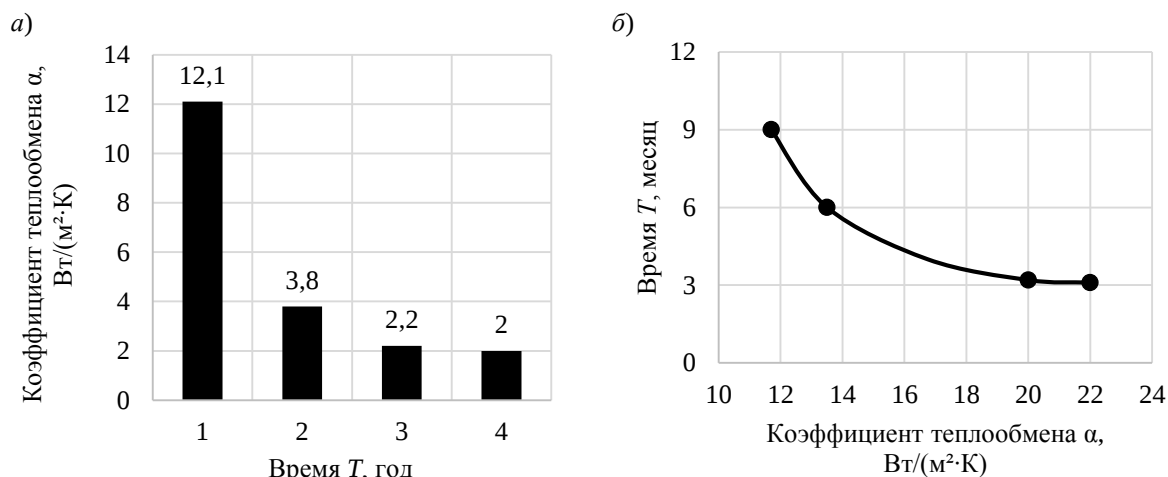


Рис. 5. Зависимость времени термостабилизации T от коэффициента теплообмена α для участка 167 км перегона Чум – Лабытнанги:

а – при многолетней термостабилизации; б – при термостабилизации за один холодный период года

время термостабилизации системы «насыпь – основание» на рассматриваемом участке и ему подобных будет составлять не менее года. Такие сроки термостабилизации основания насыпей действующих железных дорог не всегда приемлемы. Например, при снижении коэффициента общей устойчивости откосов насыпи по основанию ниже нормативных значений возникает необходимость немедленного принятия мер для обеспечения безопасности движения. При продолжающихся осадках земляного полотна требуется как можно быстрее снять установленные ограничения скорости движения поездов, что напрямую влияет на пропускную способность и экономическую эффективность железнодорожной магистрали. Длительное время термостабилизации не всегда допустимо с точки зрения организации последующих ремонтных работ по верхнему строению пути, поскольку нередко приводит к необходимости повторной выправки пути в проектное положение.

Кроме того, при длительной термостабилизации основания насыпи, сложенного водонасыщенными глинистыми грунтами, создаются условия для миграции влаги к фронту промерзания грунтов вокруг охлаждающих устройств и активного льдообразования, что может привести к процессу морозного пучения [16–18] и формированию пучин на железнодорожном пути.

Проведенное численное моделирование показало, что подход к проектированию си-

стем термостабилизации, основанный на подборе требуемого коэффициента теплообмена охлаждающего устройства, является обоснованным и практически значимым. Данный подход позволяет не только учитывать специфику конкретного объекта, но и рационально назначать тип и параметры охлаждающих устройств для обеспечения необходимых сроков термостабилизации исходя из:

- технико-экономического обоснования, технологических и эксплуатационных ограничений;
- нормативно допустимых значений пучин на железнодорожном пути, возникающих при реградации ММГ.

Основные результаты

На основании выполненных исследований сформулирован принцип проектирования охлаждающих устройств для термостабилизации оснований эксплуатируемых насыпей в криолитозоне, согласно которому для восстанавливаемых сооружений существует зависимость времени термостабилизации T от коэффициента теплообмена охлаждающих устройств α (рис. 6).

По зависимости возможно обоснованно определить требуемый коэффициент теплообмена охлаждающих устройств $\alpha_{пр}$, который необходимо обеспечить при проектировании термостабилизации с учетом соблюдения проектных сроков термостабилизации $T_{т.э}$ и снижения величины морозного пучения железнодорожного пути до предельно допустимых значений ε_u . Проектные сроки термостабилизации $T_{т.э}$ определяются исходя из технико-

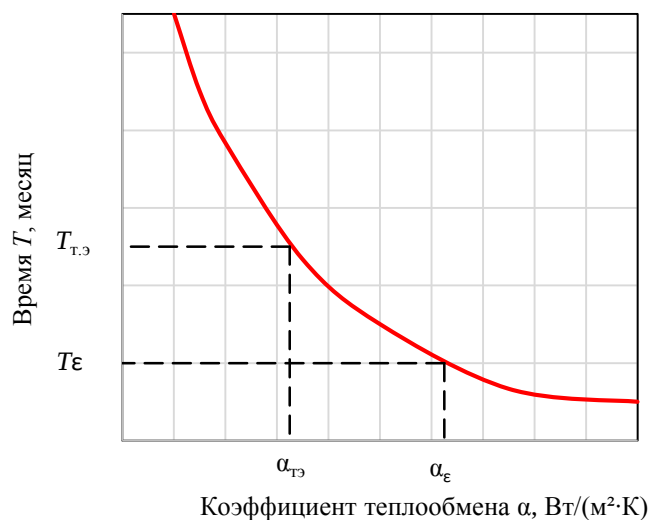


Рис. 6. Утрированная зависимость времени термостабилизации от коэффициента теплообмена охлаждающих устройств

экономического обоснования, технологических и эксплуатационных ограничений.

Величина морозного пучения ε водонасыщенных глинистых грунтов основания при реградации ММГ, в условиях значительного криогенного влагопереноса, существенно зависит от скорости промерзания грунтового массива [18]. В то же время скорость промерзания определяется общим временем термостабилизации, поэтому существует определенное значение времени термостабилизации T_{ε} , при котором величина морозного пучения не будет превышать предельно допустимых значений ε_u .

Таким образом, требуемый коэффициент теплообмена должен определяться из системы неравенств:

$$\begin{cases} \alpha_{\text{пр}} > \alpha_{T_{\varepsilon}}, \\ \alpha_{\text{пр}} > \alpha_{\varepsilon}, \end{cases}$$

где $\alpha_{T_{\varepsilon}}$ – величина коэффициента теплообмена охлаждающего устройства, при котором обеспечивается проектный срок термостабилизации T_{ε} (см. рис. 6); α_{ε} – величина коэффициента теплообмена охлаждающего устройства, при котором обеспечивается время термостабилизации T_{ε} (см. рис. 6).

Все необходимые расчеты, в том числе определение времени термостабилизации и его зависимости от коэффициента теплообмена охлаждающих устройств α , возможно выполнить в специализированных программных комплексах для теплотехнических расчетов («Frost 3D» и др.). Количественная зависимость величины морозного пучения от скорости промерзания глинистых грунтов вокруг охлаждающих устройств, на примере СОУ, получена авторами в работе [18].

Вместе с тем из приведенной выше системы неравенств следует, что в некоторых случаях могут потребоваться решения по термостабилизации, обеспечивающие коэффициент теплооб-

мена, который превышает возможности существующих СОУ. В этом случае актуально разрабатывать и применять решения, основанные на ускоренных или комбинированных способах термостабилизации, способных обеспечить более высокие итоговые значения коэффициента теплообмена между основанием земляного полотна и атмосферой.

Выводы

В работе составлена и верифицирована численная геокриологическая модель участка эксплуатируемой железнодорожной насыпи на перегоне Чум – Лабытнанги, на основании которой получена зависимость времени термостабилизации ММГ в основании сооружения от коэффициента теплообмена охлаждающих устройств.

Анализ полученной зависимости показал, что проектирование систем термостабилизации оснований с ММГ может быть эффективно реализовано через подбор коэффициента теплообмена охлаждающих устройств, обеспечивающего требуемые сроки восстановления мерзлого состояния грунтов основания и контроль над процессом морозного пучения. Сформулирован принцип проектирования охлаждающих устройств для термостабилизации оснований эксплуатируемых насыпей в криолитозоне, который позволяет определить требуемый коэффициент теплообмена $\alpha_{\text{пр}}$, обеспечивающий проектные сроки термостабилизации T_{ε} и снижение величины морозного пучения железнодорожного пути до предельно допустимых значений ε_u .

Полученные результаты выявили актуальность исследований, направленных на разработку эффективных способов ускоренной (активной) или комбинированной термостабилизации с увеличенным эквивалентным коэффициентом теплообмена охлаждающих устройств.

Список источников

1. Ашпиз Е. С. Опыт проектирования земляного полотна железных дорог России, расположенных в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов // Материалы Пятой конференции геокриологов России, Москва, 14–17 июня 2016 г. Москва : Университетская книга, 2016. С. 162–168. EDN WEQOXZ.
2. Изменения климата и динамика толщ многолетнемерзлых пород на северо-западе России в ближайшие 300 лет / В. В. Клименко, Л. Н. Хрусталева, О. В. Микушина [и др.] // Криосфера Земли. 2007. Т. XI, № 3. С. 3–13.
3. 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.

4. Cheng G., Wu Q., Ma W. Innovative designs of the permafrost roadbed for the Qinghai-Tibet railway / eds. D. L. Kane & K. M. Hinkel // Ninth International Conference on Permafrost. Institute of Northern Engineering, University of Alaska Fairbanks : 2 Vol. 2008. P. 239–247.
5. Lepage J.-M., Dore G., Fortier D., Murchison P. Thermal performance of the permafrost protection techniques at beaver creek experimental road site, Yukon, Canada / ed. K. M. Hinkel // Tenth International Conference on Permafrost. Vol. 1. International Contributions. Salekhard : The Northern Publisher, 2012. P. 261–266.
6. Ашпиз Е. С., Хрусталева Л. Н. Предотвращение деградации многолетнемерзлых грунтов в основании насыпей железных дорог // Криосфера Земли. 2020. Т. 24, № 5. С. 45–50.
7. Устройство термостабилизационных мероприятий для предотвращения деградации многолетнемерзлых оснований железнодорожных насыпей / С. А. Кудрявцев, Т. Ю. Вальцева, А. В. Кажарский, И. И. Гаврилов // Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении : материалы научно-технической конференции, Новочеркасск, 28–30 сентября 2022 г. Новочеркасск : Лик, 2022. С. 469–475. EDN ZNBLPV.
8. Жаркой А. М., Ковалева М. А., Кудрявцев С. А. Проблемы деградации многолетнемерзлых грунтов // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2023. Т. 2. С. 236–239. EDN MZHQDP.
9. Цернант А. А. Инновационные технологии управления температурой грунтовых массивов транспортных сооружений в арктических широтах // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2013. № 3. С. 26–31.
10. Ибрагимов Э. В., Кроник Я. А., Куплинова Е. В. Экспериментальные исследования инновационных конструкций пологонаклонных конструкций термостабилизаторов грунта // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 4 (45). С. 208–220.
11. Сравнительная оценка эффективности работы двухфазных термосифонов для термостабилизации грунтов в криолитозоне / Р. М. Баясан, А. Д. Лобанов, Т. В. Баясан, С. И. Голубин // Инженерные изыскания. 2012. № 7. С. 61–63.
12. Ибрагимов Э. В., Гракович Л. П. Определение теплопередающих характеристик вертикального паро-жидкостного термостабилизатора грунта с разными теплоносителями // Геотехника. 2016. № 5. С. 24–29.
13. Примаков С. С., Паздерин Д. С. О расчете теплообмена при проектировании конденсаторной части сезонно действующего охлаждающего устройства // Нефтяное хозяйство. 2013. № 4. С. 124–125.
14. Погоржальский Д. Е., Георгияди В. Г. Влияние снеготаноса на эффективность работы сезонно действующих охлаждающих устройств // Технологии обустройства нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений. 2022. № 10. С. 110–112.
15. 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.
16. Ибрагимов Э. В. Оптимизация устройства оснований и фундаментов в криолитозоне с использованием термостабилизации грунтов : специальность 05.23.02 «Основания и фундаменты, подземные сооружения» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ибрагимов Энвер Валерьевич, 2021. 150 с. EDN VXLAAD.
17. Баясан Р. М., Голубин С. И., Аврамов А. В. Особенности применения технологии термостабилизации для защиты от морозного пучения грунтов // Инженерные изыскания. 2015. № 12. С. 56–62.
18. 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. EDN UIIBGZ.

References

1. Ashpiz E. S. Experience in designing railway subgrades in permafrost regions of Russia. *Proceedings of the Fifth Conference of Russian Geocryologists, Moscow, June 14–17, 2016*. Moscow: Universitetskaya Kniga; 2016. P. 162–168. EDN WEQOXZ. (In Russ.).
2. Klimenko V. V., Khrustalev L. N., Mikushina O. V. [et al.]. Climate change and dynamics of permafrost layers in northwest Russia over the next 300 years. *Earth's Cryosphere*. 2007;XI(3):3–13. (In Russ.).
3. Razuvaev D. A., Ashpiz E. S. cryogenic issues of existing railway embankments on the eastern section of the Baikal-Amur mainline and deformation development scenarios. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(72):22–34. (In Russ.).
4. Cheng G., Wu Q., Ma W. Innovative designs of the permafrost roadbed for the Qinghai-Tibet railway. Kane D. L., Hinkel K. M., eds. *Ninth International Conference on Permafrost*. Institute of Northern Engineering, University of Alaska Fairbanks: 2 Vol. 2008. P. 239–247.

5. Lepage J.-M., Doré G., Fortier D., Murchison P. Thermal performance of permafrost protection techniques at the beaver creek experimental road site, Yukon, Canada. Hinkel K. M., ed. *Tenth International Conference on Permafrost. Vol. 1. International Contributions*. Salekhard: The Northern Publisher; 2012. P. 261–266.
6. Ashpiz E. S., Khristalev L. N. Prevention of permafrost degradation beneath railway embankments. *Earth's Cryosphere*. 2020;24(5):45–50. (In Russ.).
7. Kudryavtsev S. A., Val'tseva T. Yu., Kazharskiy A. V., Gavrilov I. I. Implementation of thermal stabilization measures to prevent degradation of permafrost foundations of railway embankments. *Soil Mechanics in Geotechnics and Foundation Engineering: Proceedings of the Scientific and Technical Conference, Novocherkassk, September 28–30, 2022*. Novocherkassk: Lik; 2022. P. 469–475. EDN ZNBLPV. (In Russ.).
8. Zharkoy A. M., Kovaleva M. A., Kudryavtsev S. A. Problems of permafrost degradation. *Scientific, Technical and Economic Cooperation of APEC Countries in the 21st Century*. 2023;2:236–239. EDN MZHQDP. (In Russ.).
9. Tsernant A. A. Innovative technologies for temperature control of soil masses in Arctic transportation infrastructure. *Construction Materials, Equipment, and Technologies of the 21st Century*. 2013;(3):26–31. (In Russ.).
10. Ibragimov E. V., Kronik Ya. A., Kuplinova E. V. Experimental studies of innovative low-inclination soil thermal stabilizer designs. *Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014;(45):208–220. (In Russ.).
11. Bayasan R. M., Lobanov A. D., Bayasan T. V., Golubin S. I. Comparative assessment of two-phase thermosyphon efficiency for soil thermal stabilization in the cryolithozone. *Engineering Surveys*. 2012;(7):61–63. (In Russ.).
12. Ibragimov E. V., Grakovich L. P. Determination of heat transfer characteristics of a vertical vapor-liquid soil thermal stabilizer with different working fluids. *Geotechnics*. 2016;(5):24–29. (In Russ.).
13. Primakov S. S., Pazderin D. S. On heat transfer calculations in the design of the condenser section of seasonal cooling devices. *Oil Industry*. 2013;(4):124–125. (In Russ.).
14. Pogorzalsky D. E., Georgiyadi V. G. The influence of snow drift on the efficiency of seasonally operating cooling devices. *Technologies for the Development of Oil, Gas and Gas Condensate Fields*. 2022. P. 110–112. (In Russ.).
15. Koloskov G. V., Ibragimov E. V., Gamzaev R. G. On the selection of optimal soil thermal stabilization systems for construction in the cryolithozone. *Geotechnics*. 2015;(6):4–11. (In Russ.).
16. Ibragimov E. V. Optimization of the design of foundations and substructures in the cryolithozone using thermal stabilization of soils. Speciality 05.23.02 'Foundations and Substructures, Underground Structures'. Dissertation for the Degree of Candidate of Engineering. Ibragimov Enver Valerievich; 2021. 150 p. (In Russ.).
17. Bayasan R. M., Golubin S. I., Avramov A. V. Specific features of applying thermal stabilization technology to prevent frost heave of soils. *Engineering Surveys*. 2015;(12):56–62. (In Russ.).
18. Razuvaev D. A., Ashpiz E. S., Nagaev E. I. Results of full-scale modeling of frost heave under thermal stabilization by seasonal cooling devices. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(75):32–41. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_75_32. EDN UIIBGZ.

Информация об авторах

Д. А. Разуваев – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Изыскания, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог» Сибирского государственного университета путей сообщения.
Е. И. Нагаев – преподаватель кафедры «Путь и путевое хозяйство» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

D. A. Razuvaev – Candidate of Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Surveying, Designing and Construction of Railways and Highways Department, Siberian Transport University.
E. I. Nagaev – Lecturer of the Track and Track Facilities Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 12.02.2026; одобрена после рецензирования 18.02.2026; принята к публикации 20.02.2026.

The article was submitted 12.02.2026; approved after reviewing 18.02.2026; accepted for publication 20.02.2026.

Научная статья
УДК 656.212+06
doi:10.52170/1815-9265_2026_78_66

О методах оценки эффективности организационных структур управления железнодорожным транспортным производством

Данил Сергеевич Безусов¹, Олег Николаевич Числов^{2✉}, Сергей Алексеевич Колошин³

^{1, 2, 3} Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия

¹ iren306@yandex.ru

² o_chislov@mail.ru✉

³ ser-koloshin@yandex.ru

Аннотация. В статье исследуются методы оценки степени эффективности взаимодействия организационных структур управления железнодорожным транспортным производством при передаче вагонопотока с общей сети на пути необщего пользования предприятий промышленного транспорта, а также других крупных грузополучателей (порты, терминалы). Представлены методы управления транспортно-технологическими процессами с учетом цифровизации, интеллектуализации, логистических управляющих комплексов для формирования единого пространства перевозок и снижения потерь на стыках взаимодействия различных видов транспорта. Рассмотрены подходы к оценке степени эффективности структур управления в условиях сложно формализуемых факторов на принципах теории нечетких множеств, техноценоза, теории систем в выборе рациональных сценариев управления транспортным процессом. Представлена постановка задачи и аналитические подходы к расчету результативности взаимодействия организационных структур управления железнодорожным транспортным производством. В современных условиях эксплуатации железнодорожный транспорт РФ сталкивается со значительными технологическими и конкурентными проблемами, решение которых возможно путем не только инфраструктурного развития, но и совершенствования организационно-технических структур управления (ОТСУ), особенно на стыке взаимодействия железнодорожного транспорта общего и необщего пользования (ППЖТ, ППНП грузоотправителей, грузополучателей). Таким образом, представленные методы научной поддержки выбора и оценки эффективных вариантов взаимодействия железнодорожных ОТСУ должны использовать многофакторные обоснования и быть связаны в перспективе с интеллектуализацией и цифровизацией. Критериями оптимальности приняты: простой местного вагона в системе и технико-экономические показатели организационных издержек. В перспективе роль ОТСУ транспортным производством будет расширяться за счет так называемых виртуальных ОТСУ, в которых на первое место выходят информационные технологии и искусственный интеллект, управляющие движением информации от нижних уровней управления к верхним в соответствии с принципами стратегического анализа принятия решений.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, организационные структуры управления, взаимодействие, транспортное производство, моделирование, техноценоз, аксиоматика, теория нечетких множеств, простой местного вагона, экономическая эффективность

Для цитирования: Безусов Д. С., Числов О. Н., Колошин С. А. О методах оценки эффективности организационных структур управления железнодорожным транспортным производством // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 1 (78). С. 66–77. DOI 10.52170/1815-9265_2026_78_77.

Original article

On methods for assessing the effectiveness of organizational structures for managing railway transport production

Danil S. Bezusov¹, Oleg N. Chislov^{2✉}, Sergey A. Koloshin³

^{1, 2, 3} Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

¹ iren306@yandex.ru

² o_chislov@mail.ru✉

³ ser-koloshin@yandex.ru

Abstract. This article explores methods for assessing the effectiveness of interactions between organizational structures managing rail transport operations when transferring wagon traffic from the public network to private tracks of industrial transport enterprises and other major freight recipients (ports and terminals). It presents methods for managing transport and technological processes, taking into account digitalization, intellectualization, and

logistics management systems for creating a unified transportation space and reducing losses at the interfaces of various modes of transport. Approaches to assessing the effectiveness of management structures in the context of complex, formalizable factors are considered, based on the principles of fuzzy set theory, technocenosis, and systems theory in selecting rational scenarios for managing the transport process. The article presents the formulation of the problem and analytical approaches to calculating the effectiveness of interactions between organizational structures managing rail transport operations. In today's operating environment, Russian rail transport faces significant technological and competitive challenges. These challenges can be addressed not only through infrastructure development but also through improving organizational and technical management structures (OTMS), particularly at the interface between public and non-public rail transport (PPZhT, PPNP, shippers, and consignees). Therefore, the presented methods for scientifically supporting the selection and evaluation of effective options for interaction between railway OTMS should utilize multifactorial justifications and, in the long term, be linked to intellectualization and digitalization. The following are accepted as optimality criteria: local car downtime in the system and technical and economic indicators of organizational costs. In the future, the role of OTMS in transport production will expand through so-called virtual OTMS, in which information technology and artificial intelligence come to the forefront, managing the flow of information from lower management levels to higher ones based on the principles of strategic decision-making analysis.

Keywords: railway transport, organizational management structures, interaction, transport production, process models, technocenosis, axiomatics, theory of fuzzy sets, simple local carriage, economic efficiency

For citation: Bezusov D. S., Chislov O. N., Koloshin S. A. On methods for assessing the effectiveness of organizational structures for managing railway transport production. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(78):66–77. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_78_66.

Введение

Железнодорожный комплекс России выполняет важнейшую системообразующую роль в социально-экономической жизни страны, обеспечивая интеграцию национальной экономики, достижение оборонных и внешнеполитических целей. В Транспортной стратегии [1] и в рамках проекта «Эффективная транспортная система» определены задачи сбалансированного и опережающего развития железнодорожного транспорта РФ.

По данным [2], за 11 месяцев 2025 г. промышленное производство в России увеличилось на 0,8 % по сравнению с аналогичным периодом 2024 г. Добыча полезных ископаемых сократилась на 1,5 %. Погрузка грузов на сети ОАО «РЖД» в 2025 г. составила 1 115,8 млн т, что на 5,6 % меньше, чем в 2024 г. Грузооборот в 2025 г. составил 2 478,3 млрд т-км (–1,8 %), а с учетом пробега вагонов в порожнем состоянии – 3 075,1 млрд т-км. Оборот грузового вагона на сети в 2025 г. равен 21,8 сут, что на 5,3 % больше, чем за тот же период в 2024 г., когда показатель составлял 20,74 сут.

Грузооборот морских портов Азово-Черноморского бассейна за 2025 г. составил 265,4 млн т (–3,9 %), из них объем перевалки сухих грузов – 118,7 млн т (–5,0 %), наливных грузов – 146,7 млн т (+1,5 %). Грузооборот морских портов Каспийского бассейна – 8,6 млн т (–5,4 %), из них объем перевалки сухих грузов – 5,7 млн т (–11,7 %), наливных грузов – 2,9 млн т (+10,3 %). Полученные объемы перевалки грузов обеспечивает в том числе транспортная система Северо-Кавказской железной дороги (СКЖД) –

филиала ОАО «РЖД», где имеются более 400 станций, среди которых три сортировочных, для выполнения грузовых операций открыта 281 станция [3], из которых 13 припортовых. В 2025 г. [3] на припортовых станциях Северо-Кавказской железной дороги было выгружено более 1,3 млн ваг. Это на 0,6 % превышает уровень 2024 г. Более пяти тысяч предприятий малого и среднего бизнеса, а также предприятия-гиганты, такие как ООО «Афипский нефтеперерабатывающий завод», АО «Невинномысский Азот», ОАО «Новоросцемент», ООО «Гленкор Агро Ростов», ООО «Руда-экспресс», ООО «ЮжТранс», пользуются услугами железнодорожного транспорта.

Следует отметить, что важнейшей частью производственно-транспортной системы юга России являются предприятия промышленного железнодорожного транспорта (ППЖТ). На долю ППЖТ приходится 32 % объема перевозок всех видов промтранспорта. Затраты на перевозки ППЖТ составляют до 20 % от себестоимости производимой промышленной продукции [2, 3]. Погрузка и выгрузка выполняются на более чем на 24 тысячах железнодорожных подъездных путей необщего пользования (ППНП). Количество предприятий, располагающих своим железнодорожным транспортом в виде железнодорожных ППНП или со своим подвижным составом, – около 3,5 тыс. На полигоне СКЖД основные ППЖТ – это ООО «НПЖТ», ОАО «МИР СКПЖТ», ОАО «КППЖТ», ОАО «ПЖТ», ООО «КЖД» и др. Показатели работы ППЖТ отличаются разнообразием, но следует отметить, что по круп-

ным предприятиям в целом отмечается рост объемов перевозки около 3–5 %.

В современных условиях эксплуатации железнодорожный транспорт РФ сталкивается со значительными технологическими и конкурентными трудностями, преодоление которых возможно путем не только инфраструктурного развития, но и совершенствования организационно-технических структур управления (ОТСУ), особенно на стыке взаимодействия железнодорожного транспорта общего и необщего пользования (ППЖТ, ППНП грузоотправителей, грузополучателей), а также взаимодействия видов транспорта (порты, терминалы и т. п.).

ОТСУ на железнодорожном транспорте присущи свойства сложных иерархичных и структурированных систем, выполняющих функции взаимодействия с клиентурой: организационно-управленческие, технико-технологические, погрузочно-транспортные, информационные и др. Несмотря на перспективное развитие, цифровизацию и внедрение инновационных технологий в управление работой на железнодорожном транспорте, ОТСУ по-прежнему сталкиваются с рядом проблем, требующих решения (рис. 1).

Поэтому в современных неустойчивых и сложно формализуемых экономических условиях эксплуатации, сопровождающихся повышенной рыночной конкуренцией, санкционными воздействиями и изменениями логистических связей, занятие передовых позиций на рынке транспортных услуг возможно только на основе развития методов управления транспортно-технологическими процессами с учетом цифровизации, интеллектуализации, логистических управляющих комплексов для

формирования единого пространства перевозок и снижения потерь на стыках взаимодействия видов транспорта [4, 5].

Модели и методы исследования ОТСУ

Вопросам управления сложными железнодорожными транспортными системами посвящены труды известных отечественных ученых [6–10]: В. И. Арсенова, В. В. Багиновой, О. В. Белого, М. М. Болотина, А. Ф. Бородина, В. Д. Верескуна, В. И. Галахова, А. В. Горского, А. Н. Гуды, Ю. И. Ефименко, Д. В. Железнова, В. Н. Зубкова, А. Я. Калининченко, П. А. Козлова, П. В. Куренкова, В. И. и М. В. Колесниковых, А. В. Кутыркина, Б. А. Левина, Н. Н. Лябаха, Л. А. Мазо, Э. А. Мамаева, Д. А. Мачерета, Л. Б. Миротина, А. С. Мишарина, А. Т. Осьминина, Н. В. Правдина, В. А. Персианова, О. Д. Покровской, М. Б. Петрова, С. М. Резера, А. А. Смехова, В. М. Сая, В. А. Шарова, М. И. Шмулевича и др.

В оценке эффективности организационных структур управления железнодорожным транспортным производством используются методы и подходы экономико-математического моделирования, теории вероятности и математической статистики, теории массового обслуживания, теории активных систем, теории графов, теории надежности, теории нечетких множеств, нейросетевого и информационного планирования.

Вместе с тем современные особенности взаимодействия ОТСУ на железнодорожном транспорте, особенно на стыке сети общего и необщего пользования, при реализации мультимодальных перевозок требуют развития существующих и разработки новых моделей и методов обоснования выбора эффективных

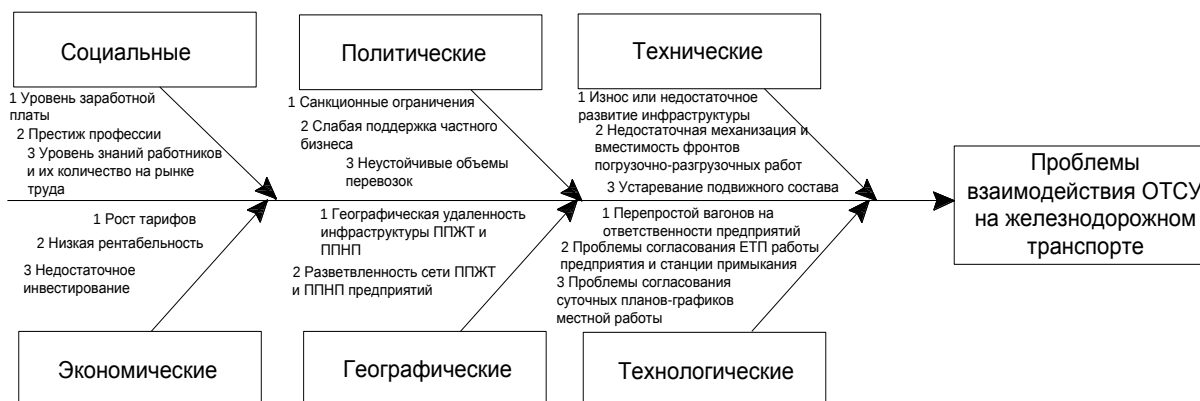


Рис. 1. Проблемы ОТСУ на железнодорожном транспорте

Согласно [7] требованиями к ОТСУ на железнодорожном транспорте является соблюдение интеграционных принципов и унификация основных стыковочных узлов схем управления по внешним и внутренним параметрам. Приняты критерии оценки качества ОТСУ: степень использования технико-технологических и инфраструктурных ресурсов; уровень транспортно-технического развития; реакция на изменения транспортного производства; способность обеспечения роста показателей транспортного производства и инновационного развития; способность изменять транспортные и информационные потоки в системе в случае непредвиденных ситуаций в работе; способность к взаимодействию с партнерами и конкурентами в условиях транспортного рынка; степень сочетаемости видов инфраструктур и транспортно-технологических процессов; техническая готовность транспортного производства к обслуживанию перевозок; ресурсная достаточность по видам деятельности и организационным структурам;

В статье рассмотрены принципы оценки эффективности ОТСУ в системах «ЖСОП – порт», «ЖСОП – ППЖТ» на основе аксиоматического подхода согласно теории нечетких множеств и техноценоза, а также ценологической теории анализа транспортных сценариев в условиях сложно формализуемых и неопределенных параметров управления [7, 8, 10, 11].

Управление транспортным производством в соответствии с принципами аксиоматики [9, 10] представляет собой логическую спецификацию транспортных процессов и структур на исполнимом логическом языке. Спецификация логической модели (прототипа) транспортного объекта задается формулами вида $\forall \bar{x}(\varphi(\bar{x}) \rightarrow \psi(\bar{x}))$, где $\bar{x}$ – вектор переменных параметров; $\varphi(\bar{x})$ – конъюнкция отношений (предикатов), равенств термов или их отрицаний; $\psi(\bar{x})$ – конъюнкция предикатов и термов, рассматриваемых как определение отношения или функции в логической модели. ОТСУ

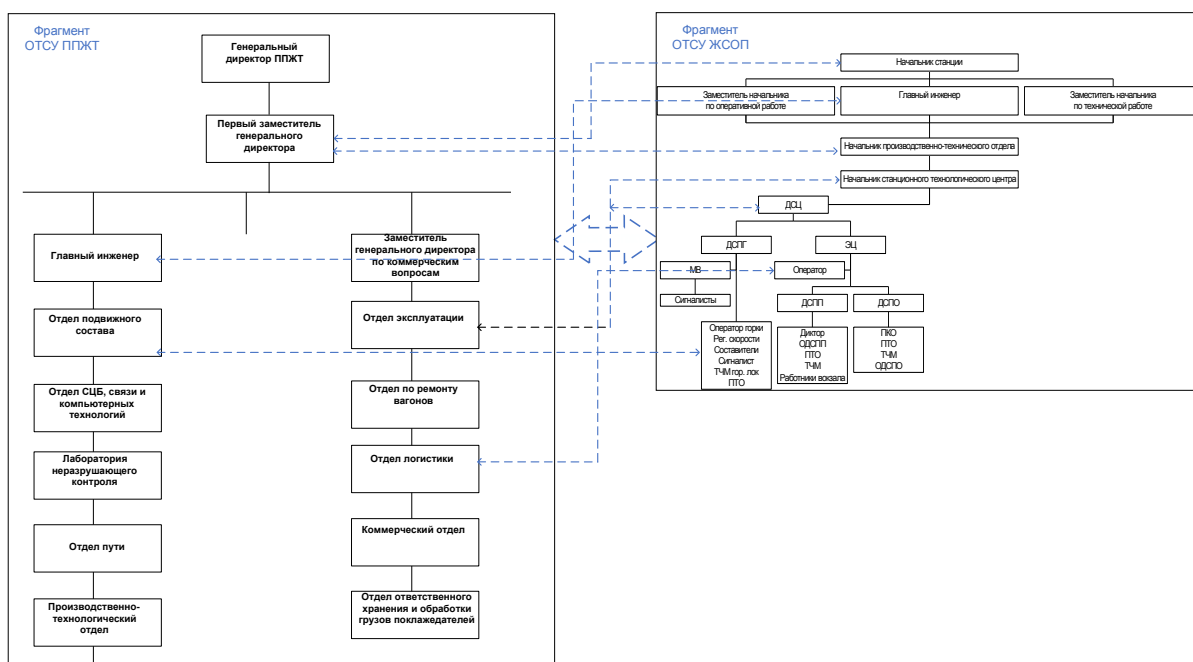


Рис. 2. Фрагменты ОТСУ и их связи в системе «ЖСОП – ППЖТ»

может включать следующие последовательности аксиомат управляющих воздействий: организация приема-отправления поездов, организация расформирования-формирования составов, организация подачи-уборки вагонов на грузовые фронты (причалы порта), продолжительность обработки в парках, продолжительность погрузки-выгрузки, продолжительность межоперационных простоев и т. д. Для оценки степени эффективности управляющих воздействий может быть принята или временная параметризация с позиций аксиоматики транспортно-технологических процессов или минимальные организационные издержки системы, включающие управленческие, технологические и упущенные выгоды.

Последовательность управляющих событий может быть представлена в виде вариантов процессов в структуре ОТСУ (рис. 3).

Задачу определения эффективной ОТСУ можно сформулировать следующим образом: для железнодорожной транспортно-технологической системы с существующей ОТСУ – $Z(S)$ при известных структурных, производственных и штатных показателях необходимо таким образом организовать управленческое взаимодействие h_r , чтобы количество и параметры транспортных процессов s_k были наиболее рациональными.

Критерии рациональности:

1) минимальное время простоя t_{ij} подвижного состава в транспортной системе:

$$T = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^v t_{ij} s_k \rightarrow \min; \quad (1)$$

2) минимальное количество управленческих воздействий при выполнении максимальных объемов работы:

$$Z(S) = \arg \min_{i,j,r,k} \{t_{ij}, h_r, \text{sgn } s_k\}; \quad (2)$$

3) минимальные организационные издержки системы управления транспортным производством, включающие управленческие, технологические и упущенные выгоды:

$$S(r) = \frac{(T_{\text{пер}} + Ar)e_{\text{лок-ч}}}{M(T_{\text{цикл}})} + \bar{X}(t) \cdot e_{\text{ваг-ч}} + \frac{M(T_0)}{M(T_{\text{цикл}})} (\sum_{p=1}^l \Pi_p) \cdot e_{\Pi} \rightarrow \min, \quad (3)$$

где $T_{\text{пер}}$ – технологическое время на передачу вагонов на ППНП порта или пути (парки) ППЖТ; A – нормативный коэффициент маневровой работы по расформированию передачи вагонов; r – количество назначений в подаче; $e_{\text{лок-ч}}$ – стоимость локомотиво-часа маневровой работы; $M(T_{\text{цикл}})$ – интервал отсутствия вагонов на ППНП порта или обменных путях ППЖТ; $\bar{X}(t)$ – парк вагонов предприятия; $e_{\text{ваг-ч}}$ – стоимость вагоно-часа простоя; $M(T_0)$ – среднее время нахождения системы в состоянии отсутствия вагонов; Π_i – перерабатывающая способность p -го грузового фронта; e_{Π} – величина потерь от резервного хранения 1 т неотправленного груза.

В условиях сложно формализуемых факторов рассмотрена постановка задачи выбора вариантов эффективного управления с позиций

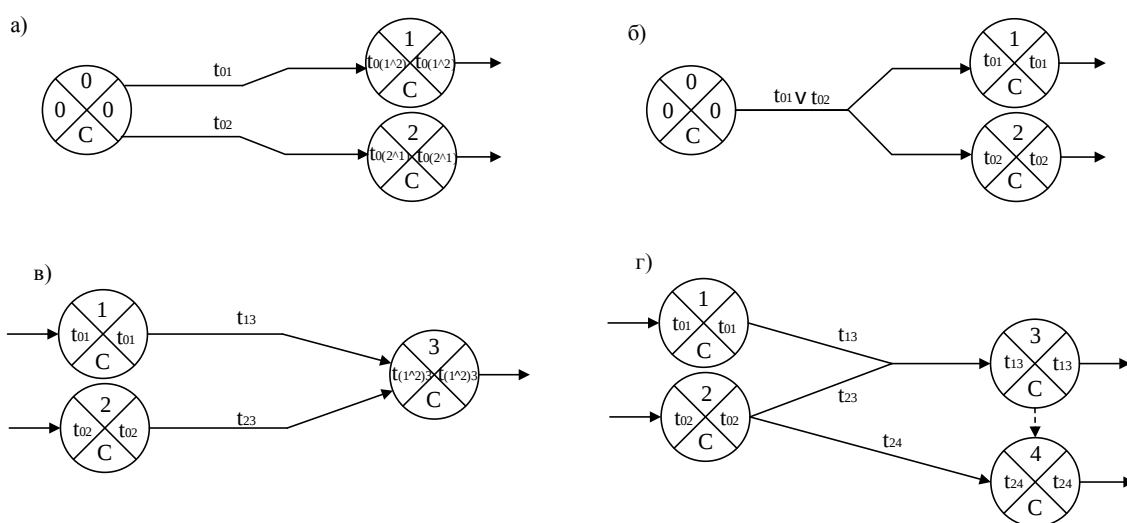


Рис. 3. Последовательность управляющих событий:

а – после начального события 0 выполняются события 1 и 2; б – после начального события 0 выполняется событие 1 или 2; в – событие 3 выполняется только после событий 1 и 2; г – событие 3 выполняется после события 1 или 2, а событие 4 выполняется после события 2 одновременно с событием 3

нечеткой временной параметризации и аксиоматики [9, 10], где s_k – параметры транспортных процессов ($k = 1, 2, \dots, v$); h_r – количество управляющих воздействий по варианту транспортной работы ($r = 1, 2, \dots, z$); $\tilde{A}_{kr} = \{(t_{kr} | \mu_{\tilde{A}}(t_{kr}))\}$ – технология работы блока ОТСУ и его продолжительность (аксиомата $\tilde{A}_{kr}$ в нечетком функциональном представлении, $\mu_{\tilde{A}}(t_{kr})$ – степень (доля) принадлежности t_{kr} в $\tilde{A}_{kr}$); a_i – количество груза или транспортных средств (грузовых поездов, передач вагонов, автомобилей, судов), прибывающих в транспортную систему за расчетный период времени ($i = 1, 2, \dots, n$); b_j – количество груза или транспортных средств, которые могут быть переработаны транспортной системой ($j = 1, 2, \dots, m$) при условии максимального обеспечения всех грузовых фронтов и минимального времени простоя подвижного состава.

Тогда множество вариантов управления $\tilde{A}(\tilde{S})$ технологических блоков $\tilde{s}_k$ ОТСУ, обеспечивающих рациональный вариант организации транспортного производства, примет вид $\tilde{A}(\tilde{S}) = \min_{i,j,k,r} \{t_{ij}, \tilde{A}_{kr} | \mu_{\tilde{A}}(\tilde{s}_k)\}$, где $\mu_{\tilde{A}}(\tilde{s}_k)$ – доля использования блока $\tilde{s}_k$ ОТСУ в последовательности блоков событий управления нечеткого подмножества $\tilde{A}_{ij}$, принимающая значения от 0 до 1.

С данными множествами выполнимы операции включения, равенства, дополнения, пересечения, объединения, позволяющие выбирать рациональные параметры аксиомат управления ОТСУ (А-ОТСУ). Для оценки нечеткости составляющих компонентов ОТСУ применима энтропия системы относительно значений вероятностей использования n -блоков структуры управления ($h_1, h_2, \dots, h_r$):

$$H(h_1, h_2, \dots, h_r) = -\sum_{r=1}^z h_r \cdot \ln h_r. \quad (4)$$

Степень беспорядка А-ОТСУ находится между $H = 0$ (минимально) и $H = 1$ (максимально). Уровень организации системы ОТСУ равен: $R = 1 - \frac{H}{H_{\max}}$, где H – текущее (фиксированное на данный момент времени) значение неопределенности системы; $H_{\max}$ – максимально возможная неопределенность системы, определяемая как $H_{\max} = \log_a n$.

Для оценки энтропии по нечеткости подмножества параметров блоков (А-ОТСУ) или составляющих времен простоя для аксиомат управления используется формула

$$H(\mu_{\tilde{A}}(\tilde{s}_1), \dots, \mu_{\tilde{A}}(\tilde{s}_k)) = -\frac{1}{\ln k} \sum_{k=1}^v \mu_{\tilde{A}}(\tilde{s}_k) \cdot \ln \mu_{\tilde{A}}(\tilde{s}_k)$$

или по нечеткости времен простоя подвижного состава

$$H(\mu_{\tilde{A}}(\tilde{t}_1), \mu_{\tilde{A}}(\tilde{t}_2), \dots, \mu_{\tilde{A}}(\tilde{t}_r)) = -\frac{1}{\ln z} \sum_{r=1}^z \mu_{\tilde{A}}(\tilde{t}_r) \cdot \ln \mu_{\tilde{A}}(\tilde{t}_r). \quad (5)$$

Блок-схема начальной логики выбора вариантов управленческих решений ОТСУ по критериям соотношения наличной и потребной перерабатывающих способностей представлена на рис. 4.

Следует отметить многовариантность параметров выбора управленческих решений ОТСУ, оценивать которые предлагается по следующим показателям [10]:

– средняя скорость транспортных процессов, ваг.(т)-оп./ч:

$$W_{\text{ОТСУ}} = \frac{n_{\text{ТП}} R m_{\text{вар(т)}}}{24 n_{\text{ОТСУ}}}; \quad (6)$$

– размер транспортного действия на протяжении железнодорожной инфраструктуры, находящейся под управлением ОТСУ, ваг.(т)·км/ч:

$$R(L) = \frac{m_{\text{вар(т)}} L}{24}; \quad (7)$$

– экономическая эффективность повышения качества транспортной работы ОТСУ от ускорения оборота подвижного состава, р.:

$$\mathcal{E}_{\text{гр}} = \Delta \vartheta_{\text{гр}} (U_n + U_{\text{пр}}^{\text{гр}}) P_{\text{ст}} \Pi_{\text{гр}}, \quad (8)$$

где $\Delta \vartheta_{\text{гр}}$ – достигнутое ускорение оборота вагона, ч; $U_n + U_{\text{пр}}^{\text{гр}}$ – работа вагонного парка, ваг./ч; $P_{\text{ст}}$ – статическая нагрузка, т/ваг.; $\Pi_{\text{гр}}$ – стоимость 1 т груза, р.;

– коэффициент эффективности ОТСУ по прогнозируемым доходам при взаимодействии транспортных систем [10, 12]:

$$k_{\text{ОТСУ}} = \frac{D_{\text{прогн}}}{D_{\text{прогн}} + \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T (\sum_{j=1}^s (D_{\text{деп}}^j)_i) + \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T (\sum_{j=s+1}^{n-m+l} (R_{\text{уб}}^j)_i)}, \quad (9)$$

где $D_{\text{прогн}}$ – прогнозируемый доход ОТСУ; $(R_{\text{уб}}^j)_i$ – убытки транспортной структуры в i -й отрезок времени в результате варианта взаимодействия с другой ОТСУ;

– коэффициент числа уровней управления по составляющим информационных потоков в системе:

$$k_y = e^{(N_n - N_{\Phi})}, \quad (10)$$

где N_n – нормативное количество уровней управления; N_{Φ} – фактическое количество уровней управления.

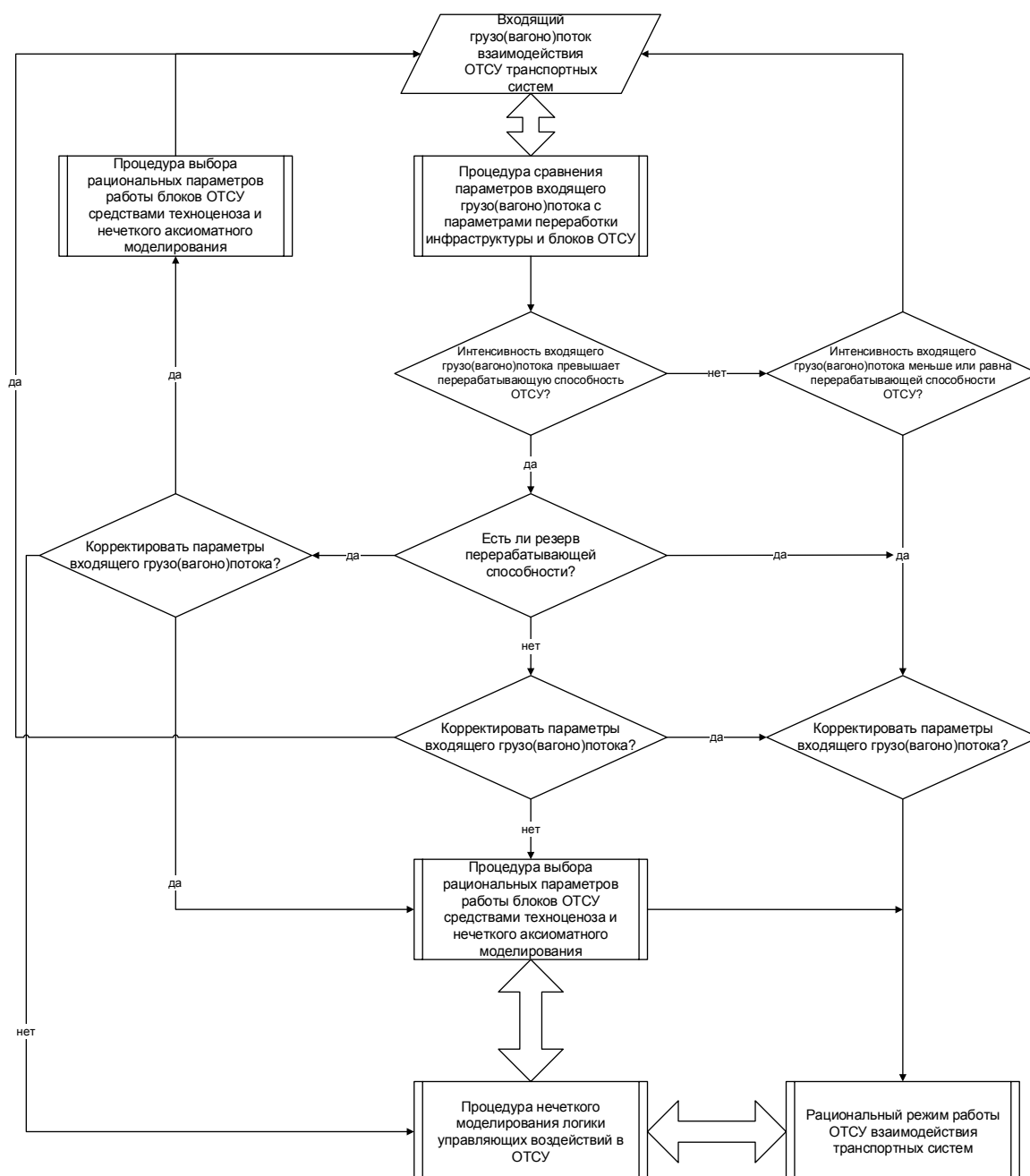


Рис. 4. Укрупненная блок-схема логики выбора вариантов решений OTSU

Нормативное количество уровней управления N_n определяется по формуле

$$N_n = \frac{\lg(S_{\text{инф}}/s_{\text{ср}})}{\lg k_{\text{сж}}}, \quad (11)$$

где $S_{\text{инф}}$ – суммарное количество информационных потоков, перерабатываемых системой OTSU; $s_{\text{ср}}$ – среднее количество элементов в информационном потоке, поступающих на каждый уровень управления организационной структуры; $k_{\text{сж}} = (s_2 + s_4)/(s_1 + s_3)$ – коэффициент сжатия информации; s_2, s_4 – количество элементов информационного потока, передаваемых на выше- и нижестоящие уровни

управления; s_1, s_3 – количество элементов информационного потока, поступающих на определенный уровень управления от выше- и нижестоящих уровней соответственно.

Так как OTSU является социотехнической системой, то она должна отвечать требованиям клиентоориентированности (клиентоцентричности), использования новых знаний и технологий, непрерывного повышения качества транспортного производства, достижения сбалансированной системы показателей.

Представлено теоретическое развитие вариативности управляющих воздействий

ОТСУ системы «ЖСОП – порт» («ЖСОП – ППЖТ») при сочетании аксиоматического подхода и техноценологических закономерностей транспортных процессов [13, 14]. Известно, что техноценоз – это искусственная система, ограниченная в пространстве и времени, со связями и едиными целями, целостная и способная эволюционировать. Устойчивость ОТСУ определяется как при внешних возмущениях системы (система должна быть способна «сохранять» себя), так и при внутренних (каждый элемент подсистемы должен иметь «комфортное» место). Следует учитывать, что крупные ОТСУ систем «ЖСОП – ППЖТ», «ЖСОП – порт», в составе которых железнодорожные станции общей сети, промышленные станции (районные парки), грузовые районы и т. п., работают эффективнее за счет своего масштаба и мощностей, но при этом они более инерционны и слабо приспосабливаются к внешним изменениям. Малые предприятия более гибкие, но в значительной степени подвержены рыночным рискам.

Согласно [7, 13, 14] структуру техноценозов принято описывать видовым распределением, ранговым параметрическим распределением и ранговым распределением по параметрам транспортной работы.

Ранговый анализ железнодорожных ОТСУ включает следующие этапы:

1. *Выделение техноценоза ОТСУ* – выбор ОТСУ железнодорожных транспортных предприятий, имеющих организационно-штатные, информационные и инфраструктурно-технологические связи, стандартизированный подвижной состав и тяговые средства с единой целью функционирования и конкуренцией на отдельных ступенях транспортного производства.

2. *Определение перечня видов в техноценозе ОТСУ* – установление полного перечня видов подвижного состава и подъемно-транспортного оборудования, используемого во взаимодействующих структурах ОТСУ, сравнение классификационных параметров (мощности тяговых средств, весовых норм, количества подвижного состава и его параметров, показателей маневровой работы).

3. *Задание видообразующих параметров* – продолжительности и стоимости простоя местного вагона, продолжительности и стоимости маневровой работы, сложности структуры управления (количества отделов, надеж-

ности структуры, объема передачи информации, численности управляющего персонала, продолжительности отклика элемента структуры на управленческое возмущение и др.).

4. *Параметрическое описание техноценоза* – формирование базы данных значений технико-технологических параметров для каждого вида оборудования и организационной структуры управления (например, род подвижного состава, назначение, количество, стоимость подвижного состава, штат работников в системе управления и др.). При этом могут использоваться как единая система измерений, так и безразмерные величины для разнородных единиц на основе вариативного показателя $k(\theta)$ с диапазоном значений от 1 до 100: $k(\theta) = 1 + 99 \cdot \frac{\theta_i - \theta_{\min}}{\theta_{\max} - \theta_{\min}}$, где 1 – нижний предел вариативного показателя; 99 – принятый размах вариации; θ_i – значение i -го показателя в выборке; $\theta_{\max}$, $\theta_{\min}$ – максимальное и минимальное значения выборки [11].

5. *Построение табулированного рангового распределения* – объединение статистики о техноценозе в виде таблицы. Первую строчку таблицы занимает запись о самом многочисленном виде техники (подвижной состав, маневровые средства, размеры грузопотока по родам грузов и их количеству, число назначений в подачах, объем передаваемой информации управления, параметры инфраструктуры и т. п.), на второе место ставится второй по размерности вид техники (инфраструктуры) и т. д.

6. *Построение графического рангового видового распределения* – графика зависимости количества технических объектов (особей) – ось ОУ, которыми представлен вид в техноценозе, от их ранга – ось ОХ (положительные целые числа, предназначенные для последующей компьютерной обработки в однобайтовом формате, что в десятичной системе составляет диапазон от 0 до 255).

Дополнительно строятся аппроксимирующие кривые. Например, на рис. 5 представлено ранговое видовое распределение годового вагонооборота от количества маневровых районов основных ППЖТ на полигоне СКЖД.

7. *Построение ранговых параметрических распределений* – графиков ранговых распределений по каждому из видообразующих параметров. Например, параметрическое рас-

Общий вид фрагмента вариантов табулированного рангового распределения техноценоза ОТСУ

Ранг	Вид техники	Количество, ед.	Видообразующий параметр			
			Грузоподъемность, т	Тара, т	Количество осей	Стоимость, тыс. р.
1	Крытые вагоны	$n_{кр}$	$q_{г}$	$q_{т}$	$n_{ос}$	$C_{кр}$
2	Полувагоны	$n_{пв}$	$q_{г}$	$q_{т}$	$n_{ос}$	$C_{пв}$
3	Платформы	$n_{пл}$	$q_{г}$	$q_{т}$	$n_{ос}$	$C_{пл}$
4	Цистерны	$n_{цс}$	$q_{г}$	$q_{т}$	$n_{ос}$	$C_{цс}$
...	...	...	...	...	...	...
Ранг	Вид техники	Количество, ед.	Мощность моторов, кВт	Вес маневрового состава, т	Служебная масса, т	Стоимость, тыс. р.
$n - 1$	Маневровые локомотивы ТЭМ23	$n_{тэм23}$	$N_{дв}$	$Q_{с}$	$Q_{т}$	$C_{тэм23}$
...	...	...	...	...	...	...
Ранг	Род груза	Объем прибытия (отправления), тыс. т	Род подвижного состава	Статическая нагрузка, т/ваг.	Время погрузки (выгрузки), ч	Стоимость 1 т груза, тыс. р.
...	...	...	...	...	...	...

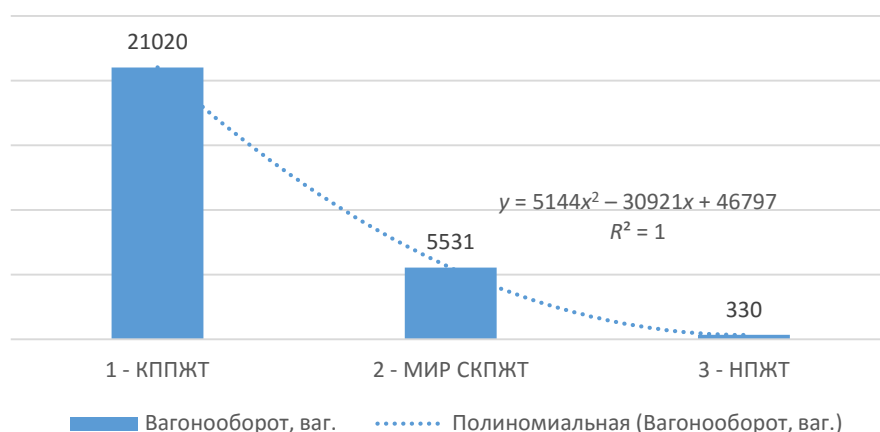


Рис. 5. Ранговое видовое распределение годового вагонооборота ППЖТ от количества обслуживаемых маневровых районов

пределение по грузоподъемности от количества подвижного состава, по мощности моторов от количества маневровых локомотивов, по количеству передаваемой информации управления от количества работников структурных отделов и т. п. Так как большинство графиков разноразмерные, то они делятся на фрагменты с соответствующим масштабом.

8. *Построение видового распределения* – построение графиков по табулированному распределению, устанавливающему взаимосвязь между множеством возможной численности особей техноценоза и количеством видов данных особей. Например, из табулированного рангового распределения величин вагонооборота маневровых районов ППЖТ на полигоне СКЖД

(рис. 6) одним значением представлены четыре маневровых района: точка с координатами (1, 4); двумя особями – два вида: точка (2, 2); тремя особями – один вид: точка (3, 1); четырьмя особями – один вид: точка (4, 1); пятью особями – два вида: точка (5, 2).

9. *Аппроксимация распределений* – подбор аналитических зависимостей, описывающих совокупность графиков 6–8 этапов [7, 13, 14]. Для решения задачи используется метод наименьших квадратов. Параметры оцениваются коэффициентами подобия между их расчетной величиной W и полученной фактически V вида $d = (\ln W)(\ln V)^{-1}$, где V , например, фактический грузооборот системы за месяц работы, соответствующий расчетному значению W .

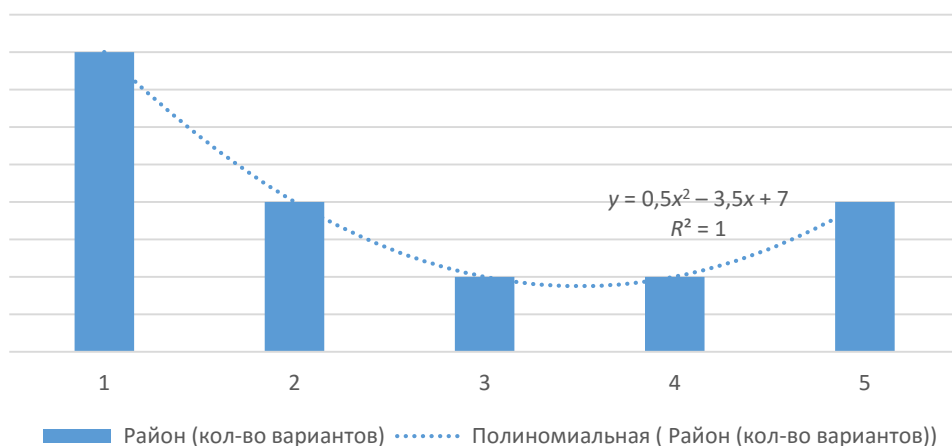


Рис. 6. Видовое распределение количества значений величин вагонооборота от количества маневровых районов ППЖТ

10. *Оптимизация* – определение направлений улучшения существующего техноценоза. Данный этап является наиболее сложным и требующим отдельного научного исследования. Приняты процедуры оптимизации [13, 14]:

1) определение направления трансформации рангового видового распределения на основе понятия об идеальном распределении, позволяющее либо увеличивать разнообразие структуры ОТСУ, техники и технологий, либо проводить их унификацию;

2) устранение областей максимальных аномальных отклонений видового распределения, при этом аппроксимационная кривая строится на основе метода наименьших квадратов по данным табулированного рангового распределения (находятся элементы структуры ОТСУ, виды техники, технологии, которые вызывают эти отклонения, и намечаются мероприятия по их устранению);

3) верификация номенклатурной оптимизации на основе статистической информации о состоянии техноценоза за принятый промежуток времени;

4) номенклатурная и параметрическая оптимизация на основе стратегии изменения параметров видов техники, приводящая техноценоз к более устойчивому состоянию.

Таким образом, оптимизация осуществляется не только за счет изменения параметров, но также и путем изменения количества элементов ОТСУ, технических средств и т. п.

Выводы

Таким образом, в статье исследуются методы оценки степени эффективности взаимодействия организационных структур управления железнодорожным транспортным производством при передаче вагонопотока с общей сети на пути необщего пользования предприятий промышленного транспорта, а также других крупных грузополучателей (порты, терминалы). Рассмотрены методы управления транспортно-технологическими процессами с учетом цифровизации, интеллектуализации, логистических управляющих комплексов для формирования единого пространства перевозок и снижения потерь на стыках взаимодействия различных видов транспорта. Представлена постановка задачи и аналитические подходы к расчету результативности взаимодействия организационных структур управления железнодорожным транспортным производством в условиях сложно формализуемых факторов на принципах теории нечетких множеств, техноценоза, теории систем в выборе рациональных сценариев управления транспортным процессом. Следует отметить, что в перспективе роль ОТСУ транспортным производством расширится за счет так называемых виртуальных ОТСУ [4, 7], которые используют информационные технологии и искусственный интеллект, управляющие движением информации от нижних уровней управления к верхним в соответствии с принципами стратегического анализа принятия решений.

Список источников

1. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р. Москва, 2021.
2. Статистика // Министерство транспорта Российской Федерации : [официальный сайт]. URL: <https://mintrans.gov.ru/ministry/results/180/documents> (дата обращения: 21.01.2026).
3. Северо-Кавказская железная дорога. URL: <http://skzdservice.ru/page/4> (дата обращения: 21.01.2026).
4. Цифровые технологии в управлении перевозочным процессом : учебное пособие / А. Т. Осьминин, О. В. Москвичев, Е. Е. Москвичева, А. В. Кабанов ; СамГУПС. Самара : СамГУПС, 2023. 206 с.
5. Транспортно-логистические системы в условиях системных изменений в экономике / Э. А. Мамаев, А. Н. Гуда, В. А. Финоченко, К. А. Годованый // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2022. № 2 (86). С. 145–154.
6. Персианов В. А., Скалов К. Ю., Усков Н. С. Моделирование транспортных систем. Москва : Транспорт, 1978. 208 с.
7. Колесников М. В., Мотренко Д. П. Управление железнодорожной транспортной системой: концепции, модели и организационные механизмы : монография / под науч. ред. д. э. н., проф. Р. В. Шеховцова и заслуженного деятеля науки и техники РФ, д. т. н., проф. С. М. Резера. Москва, 2017. 272 с.
8. Числов О. Н., Безусов Д. С. Принципы теории нечетких множеств в формализации инфраструктурно-технологического взаимодействия припортовой железнодорожной транспортной системы // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2021. № 4. С. 578–590. DOI 10.20295/1815-588X-2021-4-578-590.
9. Fuzzy modelling of the transportation logistics processes / O. Chislov, N. Lyabakh, M. Kolesnikov [et al.] // Journal of Physics : Conference Series. 2021. Vol. 2131, No. 032007. P. 1–11. DOI 10.1088/1742-6596/2131/3/032007.
10. Методы цифровизации и интеллектуализации параметров логистического взаимодействия в системе «железнодорожная станция – порт» в условиях мультиагентности транспортно-технологических процессов : монография / О. Н. Числов, М. В. Колесников, В. М. Задорожний [и др.] ; ФГБОУ ВО РГУПС ; АНО ВО НТУ «Сириус». Ростов-на-Дону : РГУПС, 2022. 396 с.
11. Безусов Д. С. Интегральная оценка показателя эффективности транспортной работы припортовых железнодорожных станций // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2022. № 3. С. 105–115. DOI 10.46973/0201-727X_2022_3_105.
12. Сай В. М., Шутюк С. В., Афанасьева Н. А. Методологические подходы моделирования взаимоотношений компании «Российские железные дороги» с регионами // Транспорт, наука, техника, управление. Москва : ВНИИТИ РАН, 2004. № 12. С. 12–15.
13. Хорьков С. А., Маврикиди Ф. И. Ценозы, системы и их модели : монография. Ижевск : Издательский центр «Удмуртский университет», 2021. 92 с.
14. Гнатюк В. И. Лекции о технике, техноценозах и техноэволюции : цикл лекций. Калининград, 2000 // Гуманитарный портал. URL: <https://gtmarket.ru/library/articles/6421/6424> (дата обращения: 21.01.2026).

References

1. Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with the Forecast for the Period up to 2035. Approved by Decree of the Government of the Russian Federation on 27.11.2021 No. 3363-r. Moscow, 2021 (In Russ.).
2. Statistics. *Ministry of Transport of the Russian Federation: [official site]*. (In Russ.). URL: <https://mintrans.gov.ru/ministry/results/180/documents>.
3. The North Caucasian Railway. Text: electronic. (In Russ.). URL: <http://skzdservice.ru/page/4>.
4. Osminin A. T., Moskvichev O. V., Moskvicheva E. E., Kabanov A. V. Digital technologies in the management of the transportation process: a textbook. Samara State Transport University. Samara: SamGUPS; 2023. 206 p. (In Russ.).
5. Mamaev E. A., Guda A. N., Finochenko V. A., Godovany K. A. Transport and logistics systems in the context of systemic changes in the economy. *Bulletin of the Rostov State Transport University*. 2022;(86):145–154. (In Russ.).
6. Persianov V. A., Skalov K. Yu., Uskov N. S. Modeling of transport systems. Moscow: Transport; 1978. 208 p. (In Russ.).
7. Kolesnikov M. V., Motrenko, D. P. Management of the railway transport system: concepts, models and organizational mechanisms: monograph. Under scientific review by Doctor of Economics, Professor R. V. Shekhovtsov and Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Doctor of Engineering, Professor S. M. Rezer. Moscow; 2017. 272 p. (In Russ.).

8. Chislov O. N., Bezusov D. S. Principles of fuzzy set theory in the formalization of infrastructural and technological interaction of the portside railway transport system. *Proceedings of the Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University*. 2021;(4):578–590. (In Russ.). DOI 10.20295/1815-588X-2021-4-578-590.
9. Chislov O., Lyabakh N., Kolesnikov M. [et al.] D. Fuzzy modelling of the transportation logistics processes. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2131(032007):1–11. DOI 10.1088/1742-6596/2131/3/032007.
10. Chislov O. N., Kolesnikov M. V., Zadorozhny V. M., Bakalov M. V., Bezusov D. S. Methods of digitalization and intellectualization of logistics interaction parameters in the railway station – port system in conditions of multi-agent transport and technological processes: monograph. Rostov State Transport University; NTU ‘Sirius’. Rostov-on-Don: Rostov State Transport University; 2022. 396 p. (In Russ.).
11. Bezusov D. S. Integral assessment of the indicator of the efficiency of transport work of portside railway stations. *Bulletin of the Rostov State Transport University*. 2022;(3):105–115. (In Russ.). DOI 10.46973/0201-727X_2022_3_105.
12. Sai V. M. Shutuyuk S. V., Afanasyeva N. A. Methodological approaches to modeling the relationship between Russian Railways and the regions. *Transport, Science, Technology and Management*. Moscow: All-Russian Institute of Scientific and Technical Information Russian Academy of Science. 2004;(12):12–15. (In Russ.).
13. Khorkov S. A., Mavrikidi F. I. Cenoses, systems and their models: monograph. Izhevsk: Udmurt University Publishing Center; 2021. 92 p. (In Russ.).
14. Gnatyuk V. I. Lectures on technology, technocenoses and techno-evolution. A series of lectures. Kaliningrad: 2000. Electronic publication: Center for Humanitarian Technologies. (In Russ.). URL: <https://gtmarket.ru/library/articles/6421/6424>.

Информация об авторах

Д. С. Безусов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Станции и грузовая работа» Ростовского государственного университета путей сообщения.

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

С. А. Колошин – инженер кафедры «Станции и грузовая работа» Ростовского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

D. S. Bezusov – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Stations and Freight Work Department, Rostov State Transport University.

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

S. A. Koloshin – Engineer of the Stations and Freight Work Department, Rostov State Transport University.

Статья поступила в редакцию 09.02.2026; одобрена после рецензирования 26.02.2026; принята к публикации 04.03.2026.

The article was submitted 09.02.2026; approved after reviewing 26.02.2026; accepted for publication 04.03.2026.

Научная статья
УДК 625.033.3+620.179.18
doi:10.52170/1815-9265_2026_78_78

Разработка способов измерения динамических сил в системе «колесо – рельс» с использованием модельного эксперимента и тензометрии

Алексей Андреевич Игумнов^{1✉}, Татьяна Викторовна Игумнова²

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

¹ iaa@yandex.ru✉

² itv@sgups.stu.ru

Аннотация. При прохождении подвижного состава по пути при взаимодействии колеса и рельса возникают динамические нагрузки, одновременно воздействующие на колесо, на остальные части вагона, а также на рельсовое полотно. Динамические силы при прочих равных условиях будут тем больше, чем больше жесткость элементов в системе, поэтому особенно сильному влиянию динамических ударов подвержены непроредресованные части вагона и рельс при увеличенной жесткости подрельсового основания. Сверхнормативные динамические силы вызывают повышенные значения напряжений и прогрессирующее развитие дефектов, развитие усталостных трещин в рельсах, в деталях вагонов. В условиях интенсификации перевозок это может иметь негативные последствия и приводить к критическим несоответствиям.

В статье рассматривается опыт постановки модельного эксперимента для изучения распределения деформаций рельсового полотна при прохождении подвижного состава при различных условиях испытаний.

Целью настоящего исследования являлось совершенствование способов измерения динамических сил в системе «колесо – рельс», а также разработка и верификация адекватных моделей для изучения процессов, протекающих в данной системе.

В рамках исследования установлены условия верификации модели, при которых возможна реализация модельных экспериментов. В работе проанализировано деформированное состояние рельса под поездной нагрузкой и оценена применимость модели к задаче оценки деформаций рельса. Проведена верификация созданной модели по типу граничных условий, по размеру конечных элементов, по типу нагрузки и размеру пятна контакта, а также по расположению граничного участка. Установлена зависимость прогиба при изменении жесткости в системе «колесо – рельс». Предложено совершенствование способа восстановления действующих нагрузок в данной системе. Предлагаемая методика определения действующих сил позволяет повысить точность измерений и уменьшить погрешности.

Ключевые слова: тензометрия, деформации рельса, динамическое воздействие, система «колесо – рельс», верификация

Для цитирования: Игумнов А. А., Игумнова Т. В. Разработка способов измерения динамических сил в системе «колесо – рельс» с использованием модельного эксперимента и тензометрии // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 1 (78). С. 78–88. DOI 10.52170/1815-9265_2026_78_78.

Original article

Development methods for measuring dynamic forces in the wheel-rail system using a model experiment and strain-gauging

Alexey A. Igumnov^{1✉}, Tatyana V. Igumnova²

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

¹ iaa@yandex.ru✉

² itv@sgups.stu.ru

Abstract. A railway rolling stock passes along the track, while the wheel interacts with the rail and dynamic loads occur in this system. The forces simultaneously act on the wheel, as well as on the rest of the car, and on the track bed. All other things being equal, the greater the rigidity of the elements in the system, the greater the dynamic forces. Unsprung parts of the carriage and the rails are particularly strongly influenced by dynamic impacts with increased rigidity of the under-rail base. If the dynamic forces turn out to be greater than normal, they cause

increased stress values and the progression of defects, the development of fatigue cracks in rails and in wagon parts. In conditions of increased transportation, this can have consequences and lead to critical defects.

The article discusses the experience of setting up a model experiment to study the distribution of deformations of the track bed during the passage of rolling stock under various test conditions.

The purpose of this study was to improve the methods of measuring dynamic forces in the wheel-rail system, as well as to develop and verify adequate models for studying the processes occurring in the wheel-rail system.

Within the framework of the study, the conditions for model verification have been established, under which the implementation of model experiments is possible. The paper analyzes the deformed state of the rail under train load and evaluates the applicability of the model to the task of estimating rail deformations. The verification of the created model was carried out by the type of boundary conditions, by the size of the finite elements, by the type of load and the size of the contact spot, as well as by the location of the boundary section. The dependence of deflection upon a change in stiffness in the wheel-rail system has been established. It is proposed to improve the method of restoring the existing loads in the wheel and rail system. The proposed method for determining the acting forces makes it possible to increase the accuracy of measurements and reduce errors.

Keywords: strain-gauging, rail deformations, dynamic impact, wheel-rail system, verification

For citation: Igumnov A. A., Igumnova T. V. Development methods for measuring dynamic forces in the wheel-rail system using a model experiment and strain-gauging. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(78):78–88. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_78_78.

Введение

В Российской Федерации введен стандарт на нормы допустимого воздействия на путь и методы испытаний. Для оценки воздействия подвижного состава на путь действительные значения показателей, определенные расчетно-экспериментальным методом, сопоставляют с допускаемыми значениями, приведенными в данном документе. Нормы допустимого воздействия при этом ограничиваются максимальными реализуемыми силами в системе «колесо – рельс» [1–3].

Для того чтобы отслеживать и оценивать процессы, происходящие в системе «колесо – рельс», может использоваться измерительная аппаратура и датчики, работа которых основана на разных принципах. С развитием электронной техники и современных средств обработки данных широкое распространение получили системы непрерывного мониторинга, которые в том числе применяются для оценки нагрузок в системе «колесо – рельс». За последние годы в России и за рубежом созданы и внедрены системы с оптическими и лазерными датчиками для определения геометрии деталей, максимальных прогибов, виброускорений, виброскоростей, а также датчики деформаций [4–9].

Стандартизированные методы регламентируют только способы оценки сил посредством регистрации относительных деформаций с использованием тензорезисторов, соединенных в тензосхемы. Решается обратная задача восстановления действующих усилий в системе со сложным сопротивлением, где на рельс воздействуют совместные нагрузки: изгиб, растяжение, кручение. Коэффициенты динамики при

этом могут меняться случайным образом. Процесс изменения нагрузок и вызванных ими деформаций, напряжений протекает достаточно быстро, и, для того чтобы регистрировать данные процессы, нужны системы обработки сигналов с определенной частотой дискретизации для проведения динамических измерений [10, 11]. Проведенный анализ отечественной нормативной документации показал, что требования к аппаратуре при этом следующие. Для измерений относительной деформации рельсов должны применяться тензорезисторы с номинальным сопротивлением от 100 до 700 Ом, базой от 10 до 20 мм. При определении вертикальной и боковой силы, действующей от колеса подвижного состава на рельс, должны применяться тензорезисторы с разбросом тензочувствительности не более 1 %. Установленная частота дискретизации сигнала должна составлять от 1 до 3 кГц.

Материалы и методы исследования

Первым и основным рассматриваемым способом является метод Шлюмпфа [12], в нем применяется тензометрическая схема из шести датчиков на шейке рельса (рис. 1), с помощью которой измеряют боковые силы F_x по разности противоположных по знаку изгибающих моментов M_z на четырех датчиках, установленных выше и ниже нейтральной оси, и вертикальные силы F_y с помощью пары датчиков, размещенных вблизи нейтральной оси. Для определения вертикальной силы выполняют калибровку измерительного сечения, прикладывая эталонную нагрузку ступенями от 20 кН до максимального значения, равного от 100 до 150 кН в зависимости от единицы подвижного состава. Применяют приспособления, которые допускают смещение точки приложения силы не более чем

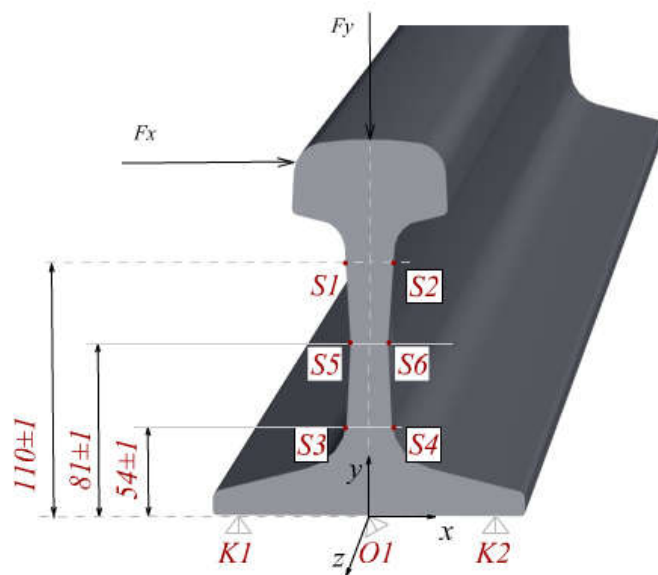


Рис. 1. Схема определения силовых факторов на рельс:
 F_y – вертикальная сила; F_x – боковая сила; S_i – места установки тензорезисторов

на 5 мм. Получают масштабный коэффициент k_1 – значение отклика на измерительном канале в зависимости от величины нагрузки. Для расчета аппроксимируют полученные данные способом наименьших квадратов. Для определения боковой силы также вычисляют масштабный коэффициент k_2 – усредненное значение отклика на измерительном канале в зависимости от величины нагрузки. При калибровке боковую силу прикладывают в точке, находящейся на 13 мм ниже уровня головки рельса с допуском 1 мм. Величина боковой силы при калибровке составляет от 20 до 100 кН при одновременно приложенной в измерительном сечении вертикальной силе.

К недостаткам данного способа можно отнести большую систематическую погрешность измерений при вносимой несимметричности установки тензометрических преобразователей по высоте, что описано в работе

[13]. Преимуществом является то, что в данном случае толщина шейки и изменение ее геометрических размеров не оказывают большого влияния на результаты расчета.

Способ соединения тензодатчиков в измерительный мост для регистрации боковой нагрузки представлен на рис. 2, вертикальной нагрузки – на рис. 3. Нумерация тензорезисторов (см. рис. 2, 3) соответствует нумерации точек S_i на рис. 1. K – компенсационные тензорезисторы, используемые для компенсации температурных напряжений.

При подключении тензорезисторов в такой измерительный мост показания канала A_1 определяются выражением, в соответствии с которым можно найти боковую силу по зависимости $F_x = k_2 A_1$:

$$A_1 = U_1 \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right), \quad (1)$$

где U_1 – напряжение питания, В; R_1, R_2, R_3, R_4 – сопротивление тензорезисторов, Ом.

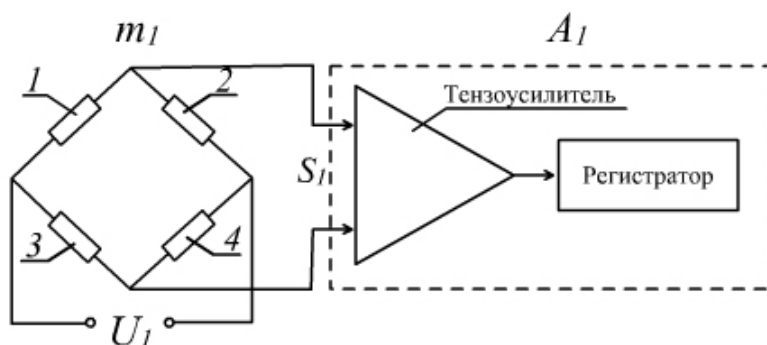


Рис. 2. Схема соединения тензорезисторов в измерительный мост для определения действующей на рельс боковой нагрузки

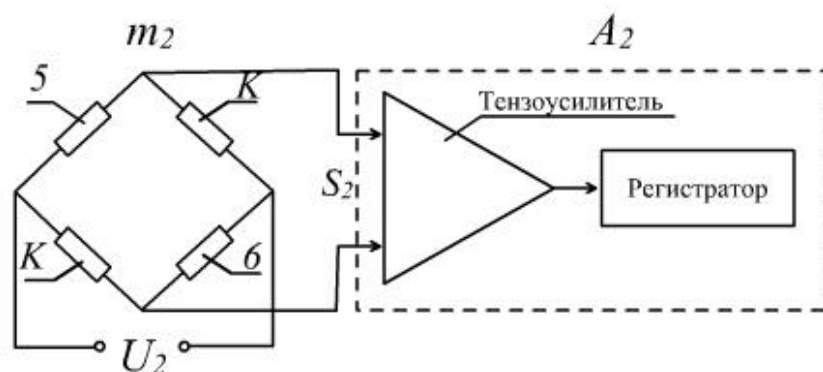


Рис. 3. Схема соединения тензорезисторов в измерительный мост для определения действующей на рельс вертикальной нагрузки

Боковая сила F_x оказывается пропорциональна разности изгибающих моментов M_z (см. рис. 1) в сечениях $S1-S2$ и $S3-S4$. Верхнее сечение $S1-S2$ ближе к боковой силе, и ее плечо меньше, а нижнее сечение $S3-S4$ оказывается дальше от боковой силы, и ее плечо больше. Для регистрации в стандартизированном методе используется полный мост Уитстона с температурной самокомпенсацией. Разница моментов учитывает вычитание моментов, вносимых эксцентриситетом вертикальной силы; из этого предположения следует, что эксцентриситет вертикальной силы не влияет на результат определения боковой силы таким способом.

При определении вертикальной силы используется пара датчиков, расположенных вблизи нейтральной оси. При этом рельс работает на изгиб в вертикальной плоскости.

Следующий способ – метод матриц влияния – подразумевает использование четырех измерительных датчиков в вертикальном направлении в точках S_1, S_2, S_3, S_4 , за его основу взят метод «РЖД-2016» [1, 3]. Для расчета сил этим способом используются матрицы влияния, связывающие действующие на рельс силы с напряжениями в местах наклейки тензодатчиков при их работе в упругой области деформаций зависимостью

$$\varepsilon_i = g_{ij} f_j, \quad (2)$$

где ε – относительные деформации; g – получаемая матрица коэффициентов; f – действующие в системе нагрузки; i, j – коэффициенты в системе матриц (векторы).

Матрицу коэффициентов g получают в процессе калибровки системы в определенной комбинации сил, которая учитывает верти-

кальную составляющую силы, боковую силу, эксцентриситет:

$$V = \{V^0 + V^1 + V^2 + V^3\}, \quad (3)$$

где $V^0, \dots, V^3$ – столбцы результатов регистрации относительных деформаций по каждому из четырех каналов тензосистемы (n каналов).

После того как калибровка проведена, находят коэффициенты псевдообратной матрицы к матрице g . Умножение ее на вектор-столбец регистрируемых относительных деформаций дает вектор действующих нагрузок. Данный метод впервые вошел в стандартные методы определения нагрузок колеса на рельс и открывает широкие возможности. Матричный метод может быть использован в других вариациях, при другом расположении датчиков [4, 14, 15]. Его преимуществом является малая погрешность влияния несимметричности установки тензодатчиков [16]. Однако минимизация погрешности расчета при восстановлении нагрузок возможна только в случае максимального приближения условий испытаний при определении коэффициентов и натурных испытаний.

Эксперименты включали в себя разработку и верификацию конечно-элементной модели участка рельсового полотна. Математическое моделирование проводилось в программной среде SolidWorks на модели рельса Р65 длиной 15 м. Таким образом, был создан виртуальный испытательный участок пути, время прохождения подвижного состава на скорости 60 км/ч по которому составит 1 с. Шпалы имитировались распределенной упругой поддержкой в вертикальной и горизонтальной плоскостях: в вертикальной плоскости значение коэффициента относительной жесткости составило для тестового

эксперимента $3 \cdot 10^9$ (Н/м)/м², в горизонтальной – $1 \cdot 10^8$ (Н/м)/м². Конечно-элементная модель соответствовала рельсу с эпюрой 2 000 шпал на 1 км пути, шпалы были распределены равномерно (рис. 4, а).

Предусматривались специальные датчики в узлах модели, которые позволили бы отслеживать отклик по перемещениям, относительным деформациям, напряжениям для определения боковой и вертикальной сил по методу Шлюмпфа и детального изучения распределения относительных деформаций в подошве рельсов с помощью тензорезисторов (см. рис. 4, в). Воздействие колеса на рельс моделировалось с помощью распределенной нагрузки. В зоне приложения нагрузки также была сгенерирована более плотная сетка конечных элементов для исключения дополнительной погрешности расчета (см. рис. 4, б). Прикладываемая нагрузка составила 100 кН, в дальнейшем после верификации в расчет будет введена вторая нагрузка от второго колеса в тележке.

Для оценки точности расчетов и повторяемости испытаний при различных модельных экспериментах устанавливался разброс и оценивалась сумма квадратов разностей для опре-

деленной линии влияния. Разброс рассчитывался по формуле

$$D = \frac{F}{A} \cdot 100 \%, \quad (4)$$

где F – сумма квадратов разностей между каждым набором относительных деформаций для точек с одинаковыми координатами в двух выборках значений относительных деформаций; A – сумма квадратов опорных значений относительных деформаций для точек с теми же координатами, что и для F .

В выполненной ранее научной работе установлено, что при определении силы в системе «колесо – рельс» следует учитывать влияние жесткости подрельсового основания [13]. Для матричного метода это влияние наиболее значительно. При вариации жесткости даже на один порядок, что очень часто можно встретить на практике, погрешность определения боковой силы достигает 10 %. Если не учитывать неопределенность жесткости подрельсового основания, могут возникать значительные погрешности при определении сил в системе колеса и рельса. По этой причине алгоритм определения сил должен разрабатываться с учетом изменения данного параметра при испытаниях.

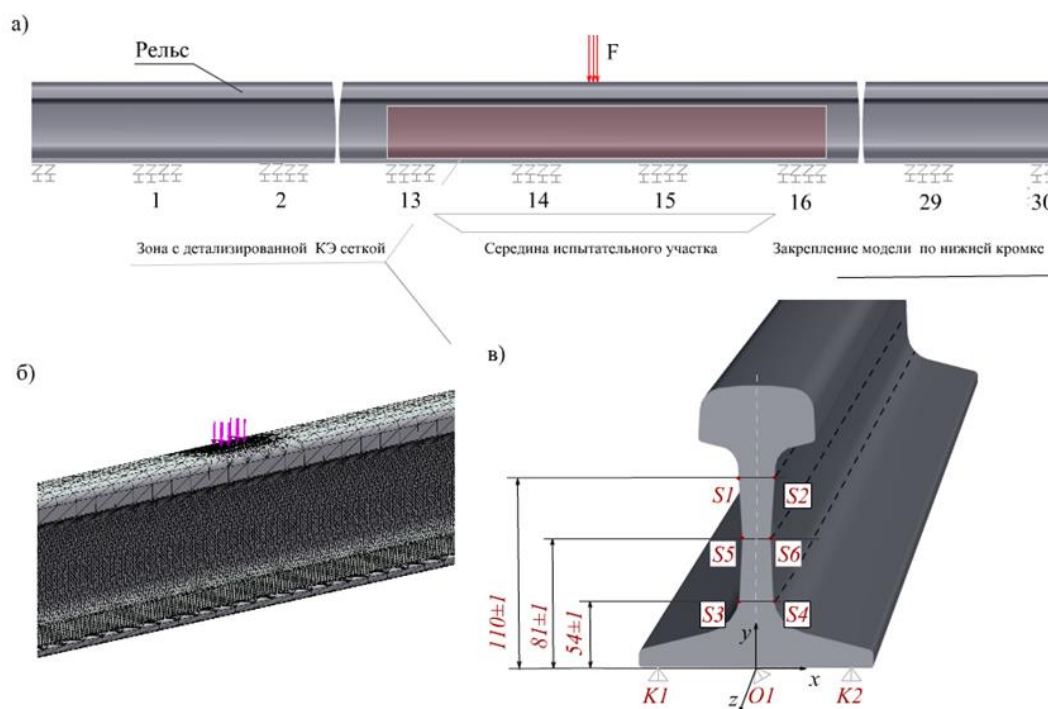


Рис. 4. Расчетная схема:

а – вид модели в длину; б – иллюстрация зон с детализированной конечно-элементной сеткой; в – поперечное сечение моделируемого рельса с линиями отклика $S1, S2, S3, S4, S5, S6, O1, K1, K2$

Цель исследования – определить пути повышения точности измерения нагрузок в системе колеса и рельса с учетом неопределенности условий испытаний. Для этого необходимо проведение модельных экспериментов на верифицированной модели, позволяющих изучить влияние различных факторов на точность восстановления нагрузок в системе колеса и рельса; минимизация источников погрешности и определение способов совершенствования расчета действующих сил от колеса на рельс.

Результаты исследования

Для исследуемой модели получены распределения относительных деформаций шейки рельса по линиям отклика $S1-S6$, а также по линиям $O1, K1, K2$ на подошве в виртуальном измерительном сечении. Для тестового модельного эксперимента проведен анализ относительных деформаций ϵ_y в шейке рельса при среднем размере конечно-элементной сетки, равном 5; 7,2; 10; 14 мм. В окрестности экстремального значения присутствует неравномерность функции для сетки 10 и 14 мм. Таким образом, для поддержания точности в дальнейших расчетах выбрана сетка со средним размером элемента 10 мм. Установлено пространственное ограничение при влиянии граничных условий. Проведен анализ результатов для симметричных линий $S1$ и $S2, S3$ и $S4, S5$ и $S6, K1$ и $K2$ (см. рис. 4). Разброс, рассчитанный по (4) для симметричных линий влияния, и относительная погрешность составили много меньше 1 %.

Выполнен анализ влияния жесткостных характеристик системы «подвижной состав –

верхнее строение пути» на результаты расчета относительных деформаций. Был проведен ряд модельных экспериментов, при равнозначных условиях изменялся только коэффициент жесткости подрельсового основания, результирующие эпюры вертикальных относительных деформаций для двух из них представлены на рис. 5. Эпюры деформаций (см. рис. 5) в шейке и подошве рельса имеют различный характер, зона экстремальных значений отличается. При увеличении коэффициента жесткости упругой поддержки больше потенциальной энергии деформаций приходится на изгиб рельса в пролете между шпалами и над опорами.

Рассмотрим случай проезда колеса над измерительным сечением l . На рис. 6 представлен отклик на виртуальных тензодатчиках $S2, S4, S6$ при проезде виртуальной модели колеса вдоль длины l при двух различных условиях податливости подрельсового основания. Даны отклики во времени виртуальных датчиков на разной высоте шейки, для модели рельса со значением $E = 3 \cdot 10^9$ (Н/м)/м² (кривая 1) и увеличенным до $E = 3 \cdot 10^{13}$ (Н/м)/м² (кривая 2). Измерительное сечение находится в середине пролета между шпалами. Применялась только вертикальная составляющая силы. Возле каждого рисунка указана высота расположения датчика от основания подошвы.

При увеличенной жесткости подрельсового основания (кривая 2 на рис. 6, $a-e$) на всех датчиках по высоте наблюдается положительный всплеск над опорами величиной от $10 \cdot 10^{-6}$ до $15 \cdot 10^{-6}$ отн. ед. при наезде колеса

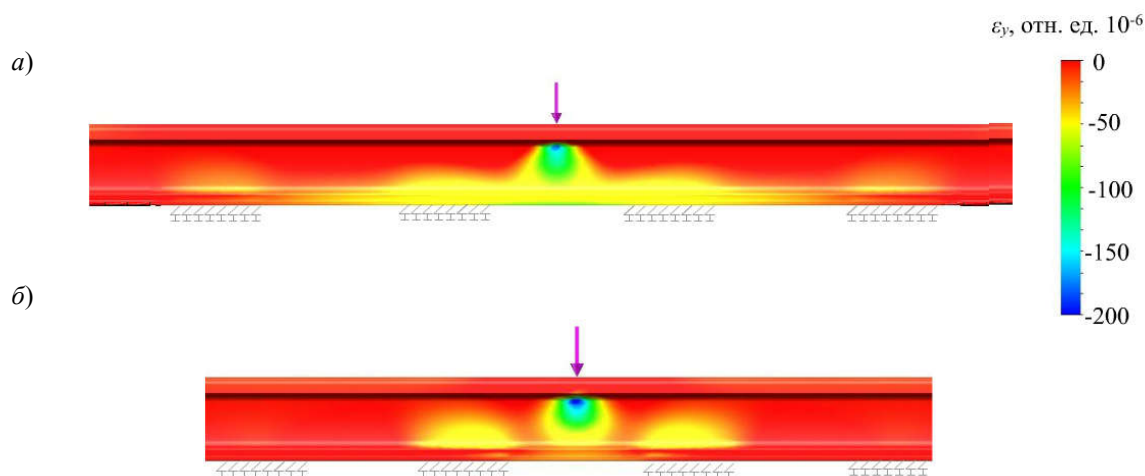


Рис. 5. Эпюры вертикальных деформаций шейки рельса для модели рельса с разным коэффициентом жесткости:
 $a - E = 3 \cdot 10^8$ (Н/м)/м²; $б - E = 3 \cdot 10^{10}$ (Н/м)/м²

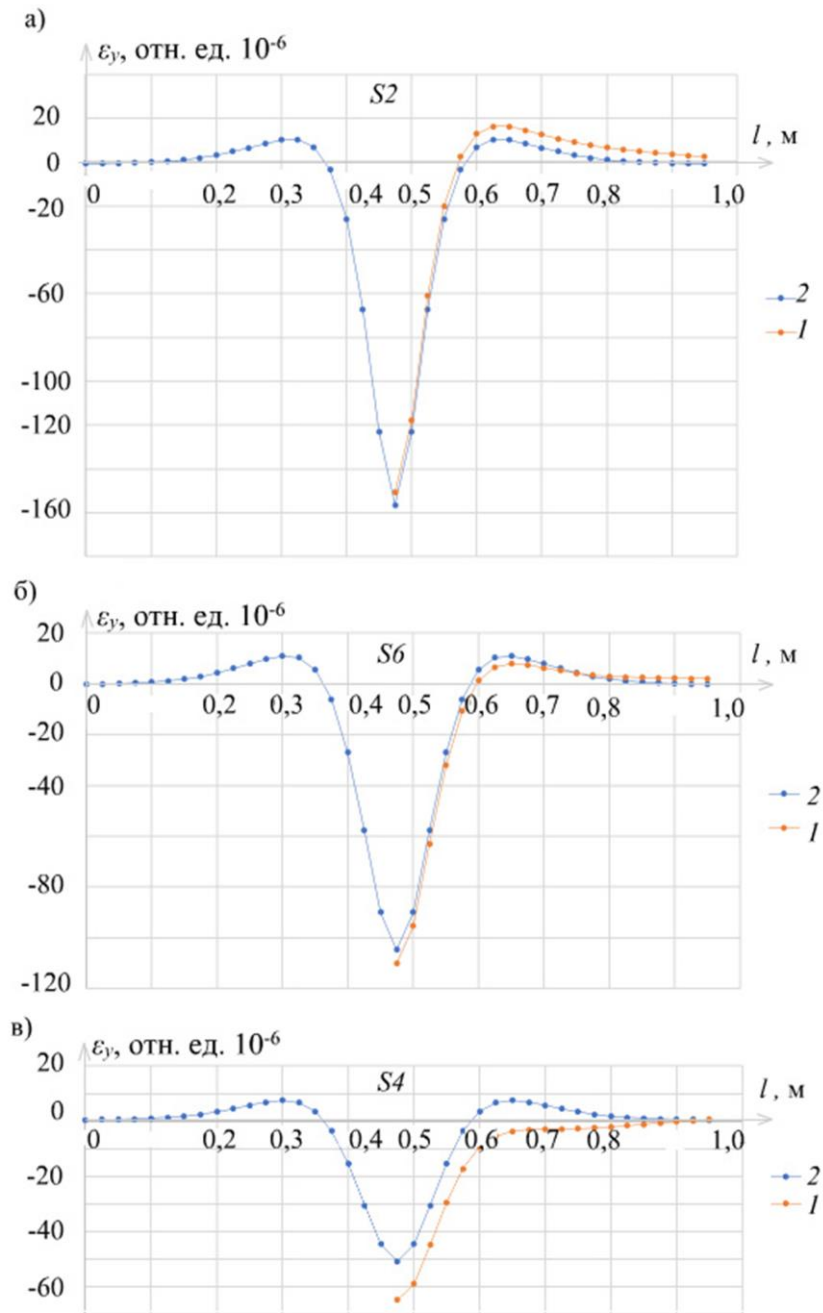


Рис. 6. Зависимость вертикальных относительных деформаций шейки на датчиках S2 (а), S6 (б), S4 (в) от расстояния до колеса:
 $1 - E = 3 \cdot 10^9 \text{ (Н/м)/м}^2$; $2 - E = 3 \cdot 10^{13} \text{ (Н/м)/м}^2$

на первую шпальную решетку по ходу поезда. Всплеск деформаций формируется за счет того, что колесо проезжает над упругим основанием. Положительный всплеск над опорами в случае меньшей жесткости присущ только для области выше нейтральной оси (кривая 1 на рис. 6, а, б). При этом эффект просадки за счет более мягкого подрельсового основания прослеживается по показаниям датчика S4 (кривая 1 на рис. 6, в).

Практически оценивать жесткостные параметры системы сложно, поэтому предложено использовать связь параметров жесткости с результирующим прогибом рельса. На рис. 7, а представлена зависимость прогиба от значения коэффициента жесткости подрельсового основания. Зависимость может быть аппроксимирована функцией $y = k x^{-0,669}$ при $k = 10^6$ с величиной достоверности аппроксимации $R = 0,998$. На рис. 7, б приве-

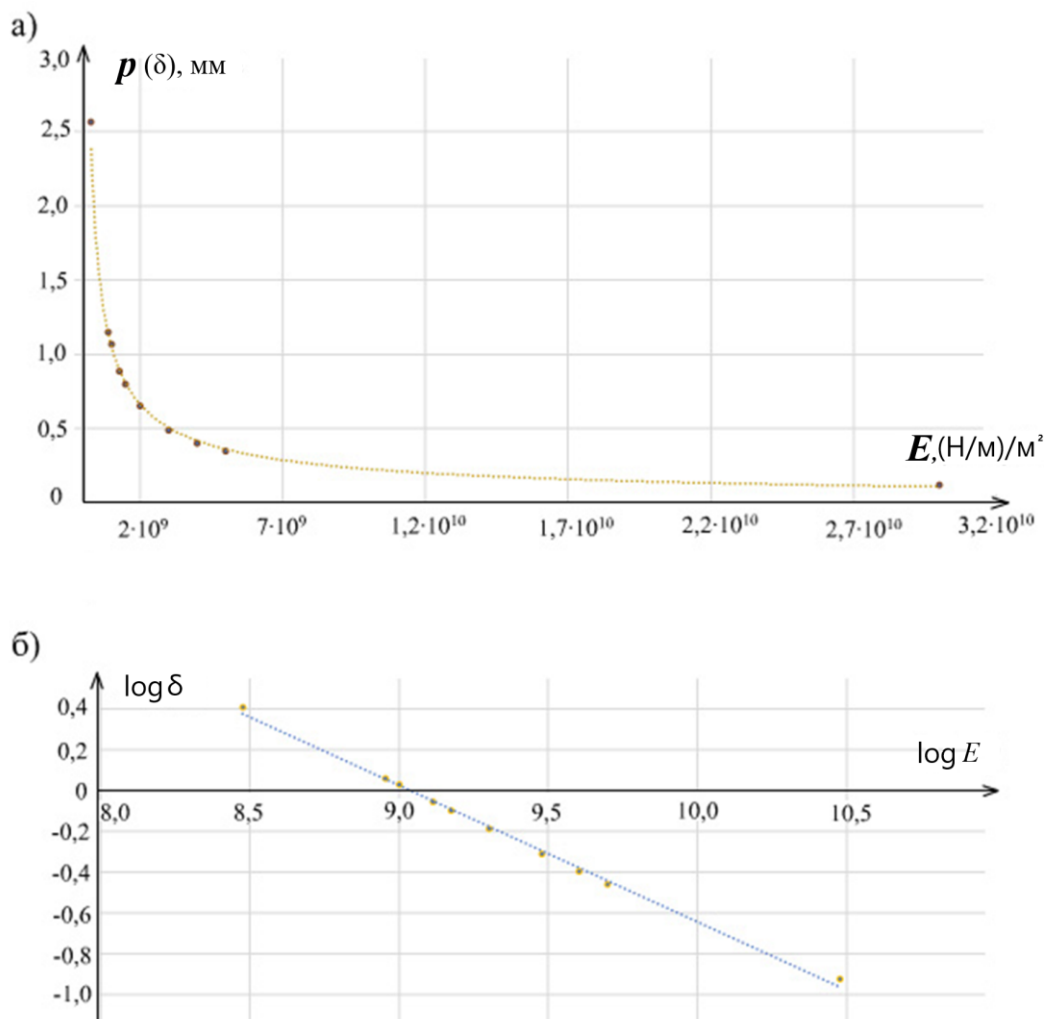


Рис. 7. Функции прогиба:
 а – зависимость $p(\delta)$ от E ; б – зависимость $\log \delta$ от $\log E$

дены те же данные в логарифмической шкале. Зависимость в этом случае описывается линейной функцией ($R = 0,9968$). Данные прогиба получены для задачи приложения нагрузки только вертикальной силой ($F_z = 100$ кН) в середине пролета между шпалами. Оценивался прогиб на уровне нейтральной оси шейки рельса. Аналогичные результаты рассчитаны для прогиба при приложении и вертикальной ($F_z = 100$ кН) и боковой ($F_y = 25$ кН) нагрузки.

С учетом анализа данных рис. 7 выбран линейный участок зависимости прогиба от логарифма коэффициента жесткости $\log E$ в пределах от 8 до 10. Прогиб p в заданном диапазоне изменяется в пределах от 0,12 до 2,5 мм. Для совершенствования матричного метода предлагается использовать зависимость p от $E(a)$ ($F(\delta)$). После получения обратной матрицы возможно восстановление действующих силовых факторов и функции прогиба по формуле

$$A(e) = \begin{cases} Q(F_y) \\ M_Q \\ F_x \\ p \end{cases} = c_{ij} a_{ij}, \quad (5)$$

где $M_Q = F_y e$ – составляющая бокового изгиба от действия вертикальной нагрузки с эксцентриситетом e ; c_{ij} – обратная матрица коэффициентов, полученная при калибровке; a_{ij} – столбец регистрируемых сигналов с тензодатчиков.

Для оценки способа был выбран вектор нагрузок для калибровки системы в диапазоне коэффициента жесткости от $E_1 = 3 \cdot 10^8$ до $E_2 = 3 \cdot 10^9$ (Н/м)/м², с максимальным прогибом $p = 2,3$ мм. Внесение в эксперимент эксцентриситета вертикальной силы обозначено как изгибающий момент M_Q , кН·мм (таблица).

Из (5) можно получить квадратную матрицу коэффициентов c_{ij} , связывающую полученный отклик на датчиках a_{ij} и вектор калиброванных воздействий $A(e)$. Для оценки

Данные для оценки достоверности разрабатываемой методики

Вид нагрузки и ее значение	Действующие значения нагрузок и варианты приложения различных комбинаций нагрузок			Восстановленные значения			Относительная погрешность, %		
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q , кН	100	100	100	99,99	102,60	93,93	–0,01	2,60	–6,00
M_Q , кН·мм	1 000	1 000	0	1 000	1 374	–186,51	–	–	–
F_x , кН	25,00	25,00	2,005	25,01	26,58	26,39	0,03	6,30	5,50
Прогиб δ , мм	0,41	0,09	2,36	0,41	0,12	0,97	–	–	–
Коэффициент жесткости основания, (Н/м)/м ²	$3 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^8$	–	–	–

достоверности разработанного способа рельс нагружали комбинацией сразу нескольких факторов: Q , M_Q , F_x – в диапазоне коэффициента E от $1 \cdot 10^8$ до $3 \cdot 10^{10}$ (Н/м)/м². Варианты приложения различных комбинаций нагрузок моделируют воздействие колеса железнодорожного подвижного состава. Примененные комбинации приведены в стб. 2–4 таблицы. Обработка результатов измерений и реализация алгоритма восстановления нагрузок по регистрируемым датчиками деформациям проводилась в среде Mathcad. Полученные значения нагрузок приведены в стб. 5–7 таблицы.

Анализ точности расчета действующих сил по предложенной методике обеспечивает восстановление нагрузок в широком диапазоне жесткости подрельсового основания. В пределах линейного участка при величине E от $1 \cdot 10^8$ до $3 \cdot 10^{10}$ (Н/м)/м² нагрузки восстанавливаются с удовлетворительной точностью. Диапазон изменения абсолютного значения прогиба шейки при таких значениях E составляет от 0,12 до 5,3 мм, что хорошо соотносится с практическими задачами.

Выводы

По результатам проведенного исследования можно заключить, что для расчетов и модельных экспериментов может быть использована верифицированная модель, учитывающая характер приложения нагрузки, средний размер элемента, ограничения по пространственному влиянию граничных условий, ха-

рактерные условия испытаний. При этом в системе колеса и рельса существуют значительные неопределенности условий испытаний.

Создан испытательный участок с измерительным сечением, включающим одиннадцать датчиков. Проведена верификация созданной модели. Рассмотрены результаты моделирования проезда колеса по виртуальному участку пути с разной жесткостью основания и анализ сигналов на датчиках в измерительном сечении в пролете между шпалами.

Установлено, что датчики, которые расположены ниже нейтральной оси рельса, больше подвержены неопределенности жесткости подрельсового основания, наименьшее влияние испытывают датчики вблизи нейтральной оси рельса.

Прогиб $p(\delta)$ в вертикальной плоскости, как суммарная реакция системы рельса с основанием на воздействие колеса, зависит от коэффициента жесткости E . Получены зависимости $p(\delta)$ от E , которые использованы для разработки алгоритма расчета действующих на рельс нагрузок по действительным значениям регистрируемых деформаций шейки. Данные зависимости могут быть применены в практике тензометрии.

Апробация описываемого способа показывает, что относительная погрешность при расчете действующих сил от колеса на рельс не превышает 6 % для боковой и вертикальной сил в условиях изменения жесткости подрельсового основания на два порядка.

Список источников

1. Гапанович В. А. Вопросы взаимодействия подвижного состава и инфраструктуры при тяжеловесном движении // Железнодорожный транспорт. 2016. № 10. С. 10–15.
2. Инфраструктура в условиях интенсификации перевозок / В. А. Гапанович, В. О. Певзнер, О. А. Суслов, В. В. Третьяков // Железнодорожный транспорт. 2016. № 3. С. 16–20.
3. ГОСТ 34759–2021. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний : введ. 2022-02-01. Москва : Издательство стандартов, 2021. 32 с.
4. Мониторинг технического состояния железнодорожного пути с использованием метода непрерывной регистрации динамических процессов, возникающих при взаимодействии подвижного состава и пути / Ю. П. Бороненко, А. В. Третьяков, Р. В. Рахимов [и др.] // Бюллетень результатов научных исследований. 2021. № 3. С. 66–82.
5. Динамические силы и процессы в рельсах при ударном взаимодействии колес с дефектами / О. Г. Краснов, О. К. Богданов, М. Г. Акашев // Вестник ВНИИЖТ. 2016. Т. 75, № 6. С. 354–364.
6. Clegg E., Blevins W. G. Wheel impact load detector experience on CN // American Railway Engineering Association Bulletin. 1996. October. P. 499–523.
7. Оптическая тензометрия в задаче взаимодействия колесо – рельс / В. Н. Федоринин, С. А. Бехер, В. С. Выплавень [и др.] // Автометрия. 2023. Т. 59, № 3. С. 33–42.
8. Достигнутый результат внедрения поста акселерометрического универсального контроля и дальнейшие перспективы при определении дефектов на поверхности катания колес вагонов / А. С. Ададунов, А. В. Нерезков, В. И. Федорова [и др.] // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2021. № 1 (69). С. 192–199.
9. Суслов О. А., Ададунов А. С. Экспериментальные исследования цифровых акселерометров и систем обнаружения дефектов поверхности катания колес подвижного состава на их основе // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. 2019. № 3 (47). С. 40–45.
10. Овчинников Д. В., Суслов О. А. Моделирование устойчивости бесстыкового пути при температурных нагрузках и критерии определения допускаемой температуры нагрева рельсовых плетей по условию недопущения выброса пути в процессе эксплуатации // Наука и образование транспорту. 2021. № 2. С. 238–243.
11. Оптимизация взаимодействия в системе колесо – рельс / С. А. Виноградов, А. В. Сухов, А. А. Лунин [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2023. № 3. С. 37–45.
12. Schlumpf G. Messungen mit Dehnungsmesstreifen bei den SBB // Technische Rundschau. Bern, 1955. No. 26. S. 35–41.
13. Sych T., Kolomeets A. Methods of determination of forces in the “wheel-rail” system // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 216. P. 03009.
14. Анализ методов измерений силового воздействия подвижного состава на путь и систем технического контроля колес при движении поезда / Ю. П. Бороненко, Р. В. Рахимов, Р. Ю. Григорьев, В. В. Попов // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2020. Т. 17, № 3. С. 324–344.
15. Ершков О. П. Установление коэффициентов, учитывающих боковой изгиб и кручение рельсов // Труды ЦНИИ МПС. Москва : Трансжелдориздат, 1955. Вып. 97. С. 289–325.
16. Разработка средств мониторинга динамических процессов взаимодействия колес и рельсов в эксплуатации / С. А. Бехер, Т. В. Сыч, А. О. Коломеец, А. С. Кочетков // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2018. № 3 (46). С. 33–42. EDN YAATUT.

References

1. Gapanovich V. A. Issues of interaction of rolling stock and infrastructure in heavy traffic. *Railway Transport*. 2016;(10):10–15. (In Russ.).
2. Gapanovich V. A., Pevsner V. O., Suslov O. A., Tretyakov V. V. Infrastructure in conditions of transportation intensification. *Railway Transport*. 2016;(3):16–20. (In Russ.).
3. Federal Law of the Russian Federation No. 34759-2021. Railway rolling stock. Standards of permissible impact on the railway track and testing methods. Introduction. 2022-02-01. Moscow: Publishing House of Standards; 2021. 32 p. (In Russ.).
4. Boronenko Yu. P., Tretyakov A. V., Rakhimov R. V. [et al.]. Monitoring the technical condition of the railway track using the method of continuous registration of dynamic processes occurring during the interaction of rolling stock and track. *Bulletin of Scientific Research Results*. 2021;(3):66–82. (In Russ.).

5. Krasnov O. G., Bogdanov O. K., Akashev M. G. Dynamic forces and processes in rails during the impact interaction of wheels with defects. *The Russian Railway Science Journal*. 2016;75(6):354–364. (In Russ.).
6. Clegg E., Blevins W. G. Wheel impact load detector experience on CN. *American Railway Engineering Association Bulletin*. October 1996. P. 499–523.
7. Fedorin V. N., Bekher S. A., Vyplaven V. S. [et al.]. Optical strain gauge in the wheel-rail interaction problem. *Autometry*. 2023;59(3):33–42. (In Russ.).
8. Adadurov A. S., Nerezkov A. V., Fedorova V. I. [et al.]. The achieved result of the introduction of an accelerometric universal control post and further prospects for determining defects on the rolling surface of wagon wheels. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2021;(69):192–199. (In Russ.).
9. Suslov O. A., Adadurov A. S. Experimental studies of digital accelerometer and systems for detecting rolling surface defects based on them. *Bulletin of the Institute of Problems of Natural Monopolies: Railway Engineering*. 2019;(47):40–45. (In Russ.).
10. Ovchinnikov D. V., Suslov O. A. Modeling the stability of continuous welded rail track under temperature loads and criteria for determining the permissible heating temperature of rail strings under the condition of preventing track ejection during operation. *Science and Education of the Transport*. 2021;(2):238–243. (In Russ.).
11. Vinogradov S. A., Sukhov A. V., Lunin A. A. [et al.]. Optimization of interaction in the wheel – rail system. *Railway Transport*. 2023;(3):37–45. (In Russ.).
12. Schlumpf G. Messungen mit Dehnungsmesstreifen bei den SBB. *Technische Rundschau*. Bern; 1955. No. 26. S. 35–41.
13. Sych T., Kolomeets A. Methods of determination of forces in the “wheel-rail” system. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 216. P. 03009.
14. Boronenko Yu. P., Rakhimov R. V., Grigoriev R. Yu., Popov V. V. Analysis of methods for measuring the force effect of rolling stock on the track and systems of technical control of the co-forest during train movement. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2020;17(3):324–344. (In Russ.).
15. Yershkov O. P. The establishment of coefficients that take into account lateral bending and torsion of rails. *Proceedings of the Central Research Institute of the Ministry of Railways*. Moscow: Transzheldorizdat; 1955. Issue 97. P. 289–325. (In Russ.).
16. Bekher S. A., Sych T. V., Kolomeets A. O., Kochetkov A. S. Development of monitoring tools for dynamic processes of interaction of wheels and rails in operation. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2018;(46):33–42. (In Russ.).

Информация об авторах

А. А. Игумнов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Т. В. Игумнова – кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИЛ «Физические методы контроля качества» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

A. A. Igumnov – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Technology of Transport Engineering and Operation of Machines Department, Siberian Transport University.

T. V. Igumnova – Candidate of Engineering, Senior Researcher of the Physical Methods of Quality Control Laboratory, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 03.02.2026; одобрена после рецензирования 05.03.2026; принята к публикации 06.03.2026.

The article was submitted 03.02.2026; approved after reviewing 05.03.2026; accepted for publication 06.03.2026.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья
УДК 624.191.814.4
doi:10.52170/1815-9265_2026_78_89

Определение усилий обделок транспортных тоннелей на заданные нагрузки по гипотезе общих деформаций методами численного моделирования

Анатолий Олегович Кузнецов

Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия, kuzemon91@mail.ru

Аннотация. Определение усилий в обделках транспортных тоннелей – одна из ключевых задач проектировщиков. Существует несколько методов решения этой задачи, в статье рассмотрены следующие: метод строительной механики, аналитические методы механики сплошной среды и методы численного моделирования. Эти методы прописаны в действующих нормативных документах и применяются проектировщиками для расчета обделок транспортных тоннелей.

Автор предлагает смешанный метод, который объединяет элементы методов строительной механики и механики сплошной среды. Этот подход позволяет получать эпюры внутренних усилий, аналогичные рассчитанным методом строительной механики и совпадающие с ними как качественно, так и количественно. Особенность смешанного метода заключается в использовании данных из обоих подходов. Для связи обоих методов коэффициент упругого отпора грунта пересчитывается в модуль деформации грунта, который, в отличие от первого, можно определить лабораторным путем. Проверка смешанного метода проводилась на двух тоннельных обделках – кругового и подковообразного очертаний. Результаты сравнивались с данными, полученными методом строительной механики и методом механики сплошной среды с помощью численного метода конечных элементов в программном комплексе Midas GTS NX. В статье приведено качественное и количественное сравнение результатов трех методов расчета.

В заключение предложены рекомендации по использованию смешанного метода в проектировании транспортных тоннелей. Этот подход можно применять как альтернативу для проверки результатов, полученных методом строительной механики, на заданные нагрузки. Например, смешанный метод будет полезен при научно-техническом сопровождении проектной документации как альтернативный метод расчета.

Ключевые слова: статический расчет тоннеля, коэффициент упругого отпора, деформационные характеристики грунта, строительная механика, метод конечных элементов

Для цитирования: Кузнецов А. О. Определение усилий обделок транспортных тоннелей на заданные нагрузки по гипотезе общих деформаций методами численного моделирования // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 1 (78). С. 89–96. DOI 10.52170/1815-9265_2026_78_89.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Determining the forces in the lining of transport tunnel for given loads under the general deformation hypothesis using numerical modeling methods

Anatoly O. Kuznetsov

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia, kuzemon91@mail.ru

Abstract. Determining the forces in the lining of transport tunnels is one of the key tasks for designers. There are several methods for solving this problem, and the article discusses three of them: the method of structural mechanics, analytical methods of continuum mechanics, and numerical modeling methods. These methods are prescribed in the current regulatory documents and are used by designers to calculate the lining of transport tunnels.

The author suggests a mixed method that combines elements of structural mechanics and continuum mechanics methods. This approach makes it possible to obtain internal force plots similar to the method of structural mechanics, both qualitatively and quantitatively. The special feature of the mixed method is the use of data from both approaches. In order to link both methods, the coefficient of elastic resistance of the soil is recalculated into the modulus of deformation of the soil, which, unlike the first one, can be determined in the laboratory. The mixed method was tested on two tunnel linings – circular and horseshoe-shaped. The results were compared with the data obtained by the method of structural mechanics and the method of continuum mechanics using the numerical finite element method in the Midas GTS NX software package.

The article provides a qualitative and quantitative comparison of the results of the three calculation methods. In conclusion, recommendations on the use of the mixed method in the design of transport tunnels are proposed. This approach can be used as an alternative to test the results of the structural mechanics method for specified loads. For example, the mixed method will be useful in scientific and technical support of project documentation as an alternative calculation method.

Keywords: static analysis tunnel, modulus of subgrade reaction, deformation parameters, analysis of structures, finite-element method

For citation: Kuznetsov A. O. Determining the forces in the lining of transport tunnel for given loads under the general deformation hypothesis using numerical modeling methods. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(78):89–96. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_78_89.

Введение

В соответствии с требованиями нормативных документов [1–3] расчет обделок транспортных тоннелей возможно производить по трем методам (рис. 1): 1) методами строительной механики на заданные нагрузки; 2) аналитическими методами механики сплошной среды; 3) методами численного моделирования.

По первому методу конструкция обделки представляет собой изогнутую балку (чаще – с целью упрощения – ломаную линию) переменной жесткости на упругом основании, классическая интерпретация метода расчета изложена в достаточном количестве учебной и научной литературы [4–7]. Следует отметить, что в этом методе грунт на контакте с конструкцией работает по гипотезе Фусса – Винклера, т. е. по гипотезе местных деформаций.

К достоинствам первого метода следует отнести возможность ручного расчета обделки методами строительной механики, в частности методом сил или методом перемещений.

К недостаткам данного метода расчета из-за использования гипотезы местных деформаций следует отнести применение коэффициента пропорциональности k , именуемого

коэффициентом упругого отпора грунта [1–2]. Данный коэффициент возможно получить:

– экспериментальным путем (однако отсутствует стандарт на определение данной характеристики);

– используя справочные значения, приведенные в нормативных документах (табл. 5.13 [1], табл. 5.8 [2]);

– используя формулу Галеркина, связывающую коэффициент упругого отпора и деформационные характеристики грунтового массива [8–10].

Во втором методе рассматривают поле напряженно-деформированного состояния грунтового массива с отверстием в нем и решают контактную задачу. В этом методе грунт на контакте с конструкцией работает в соответствии с гипотезой общих деформаций.

К достоинствам второго метода следует отнести реальную картину напряженно-деформированного состояния системы «грунтовой массив – обделка», так как описание грунтового массива производится известными деформационными характеристиками, в частности модулем деформации и коэффициентом относительной поперечной деформации, получаемым изыскателями лабораторным путем

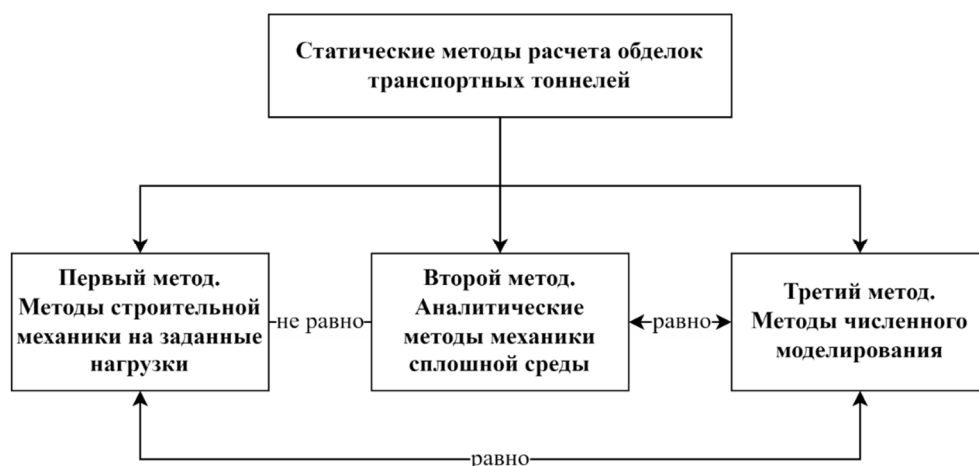


Рис. 1. Методы расчета тоннельных обделок, указанные в нормативных документах

(существуют стандарты на определение данных характеристик [11, 12]).

Недостатками второго метода расчета являются:

- высокий порог входа расчетчика (понимание аналитических методов механики сплошной среды);
- отсутствие учета разгрузки (технологических особенностей разработки выработки) грунтового массива до возведения обделки;
- неопределенности в учете контакта взаимодействия грунтового массива и несущей конструкции.

Третий метод, в частности одну из его разновидностей – метод конечных элементов (МКЭ), можно назвать инструментом для реализации решения задач первого или второго метода.

Третий метод нивелирует достоинства и недостатки первого и второго методов расчета. И позволяет исключить недостаток второго метода проведением научно-технического сопровождения строительства объекта в сочетании с геотехническим мониторингом и сопоставлением графиков равновесных состояний с результатами расчета тоннеля, например β -методом [13]. Следует еще раз отметить, что МКЭ не является отдельным, самостоятельным методом расчета, это инструмент, позволяющий в более оперативном режиме (относительно ручного и аналитического расчетов) принимать инженерно-технические решения.

В Сибирском государственном университете путей сообщения на кафедре «Геотехника, тоннели и метрополитены» на протяжении более 10 лет автором статьи на практических занятиях в курсах «Механика подземных сооружений» и «Математическое моделирование систем и процессов» приводится решение задачи о расчете обделок транспортных тоннелей на заданные нагрузки по гипотезе общих деформаций методами численного моделирования, включающее в себя компоненты всех трех методов, с сопоставлением результатов решения по первому и второму методам. Данный метод получил название *смешанного*, так как не относится ни к первому методу, ни ко второму, а является связывающим эти методы звеном (рис. 2).

Третий метод используется в качестве инструмента для решения задач, в частности МКЭ в программном комплексе Midas GTS NX. Следует отметить, что подобное решение можно реализовать в любом конечно-элементном комплексе, включающем в себя одно- и двумерные конечные элементы. Это сравнение позволило не только ответить на вопрос, почему усилия, рассчитанные методом Метрогипротранса (например, в программе РК-6 – первый метод), не отличаются от усилий, полученных МКЭ (например, в Midas GTS NX – первый метод), но и научить студентов получать такие же усилия в конструкциях обделок альтернативными методами, в частности методом конечных элементов.



Рис. 2. Смешанный метод расчета тоннельных обделок

Суть смешанного метода проста: геометрические характеристики, материал конструкции обделки, нагрузки берут из первого метода, а граничные условия, материал грунта, контакт взаимодействия – из второго (см. рис. 2). С целью недопущения влияния дополнительного вертикального давления от веса грунта предлагается моделировать грунт невесомой средой. Контакт обделка – грунтовый массив моделируют с нулевым (или приближенным к нулю) трением, как и в первом методе расчета.

К достоинствам смешанного метода можно отнести возможность определять усилия обделок транспортных сооружений на основании инженерно-геологических характеристик грунтового массива (модуля деформации и коэффициента относительной поперечной деформации), полученных экспериментальным путем, в условиях гипотезы общих деформаций.

Недостатком смешанного подхода является невозможность качественно оценить состояние грунтового массива возле выработки в силу отсутствия начального поля напряженного-деформированного состояния грунтового массива (невесомая среда).

Метод исследования

При проектировании обделок транспортных тоннелей ключевыми параметрами для расчета являются значения внутренних усилий. Ниже приведено сравнение значений экстремальных внутренних усилий в обделках транспортных тоннелей, смоделированных первым, вторым и смешанным методами. В качестве иллюстрации в статье приводится решение для двух обделок

(кругового и подковообразного очертаний). Для вычисления усилий применялся МКЭ, который реализован в программном комплексе Midas GTS NX 2024 v.1.1.

Исходные данные для двух задач приведены в табл. 1 и на рис. 3.

Расчетные модели всех трех методов, смоделированных в Midas GTS NX 2024 v.1.1, приведены на рис. 4–6. Размеры граничных условий для каждой расчетной модели подобраны так, чтобы минимизировать влияние краевых эффектов (граничных условий) на результаты расчета. Далее в статье приводятся рисунки расчетных схем, моделей и результатов только для обделки подковообразного очертания, так как моделирование обделки кругового очертания имеет схожий характер.

Результаты исследования

Результаты расчета, в частности эпюра изгибающих моментов и продольных сил и их экстремальные значения, приведены на рис. 7, 8 и в табл. 2.

Как видно из табл. 2 и рис. 7, 8, значения, полученные первым и смешанным методами, имеют более схожие значения. Относительная погрешность экстремальных значений эпюр между этими методами может достигать 10 %. Это связано с тем, что при моделировании грунта плоскими конечными элементами мы получаем приближенное решение, близкое к аналитическому.

Относительная погрешность между первым и вторым методом достигает 325 %, что доказывает их неравенство.

Таблица 1

Исходные данные для расчета обделок

Очертание обделки	Класс бетона обделки по прочности	Гипотеза обрушения грунта	Параметр				
			Высота свода обрушения, м	Удельный вес грунта, кН/м ³	Коэффициент относительной поперечной деформации	Коэффициент упругого отпора грунта, кН/м ³	Модуль деформации грунта, пересчитанный по формуле Галеркина, кПа
Круговое	B40	Свод обрушения, оказывающий только вертикальное давление	2,5	20	0,3	200 000	695 500
Подковообразное	B30						1 020 000

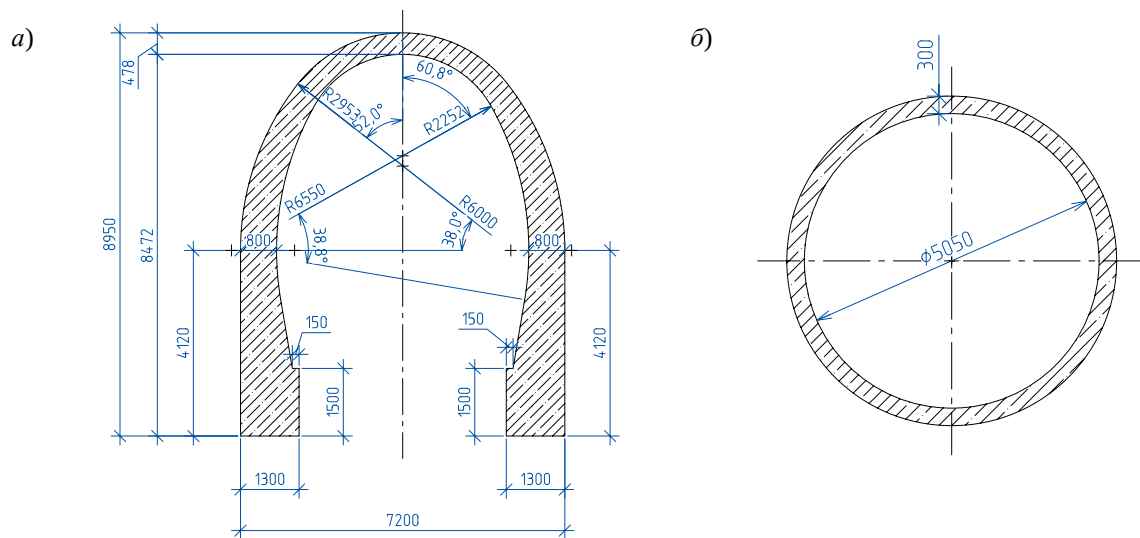


Рис. 3. Геометрические размеры поперечного сечения обделки тоннеля:
 а – подковообразного очертания; б – кругового очертания

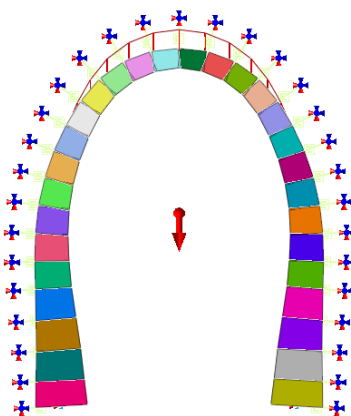


Рис. 4. Расчетная модель обделки тоннеля подковообразного очертания, созданная первым методом

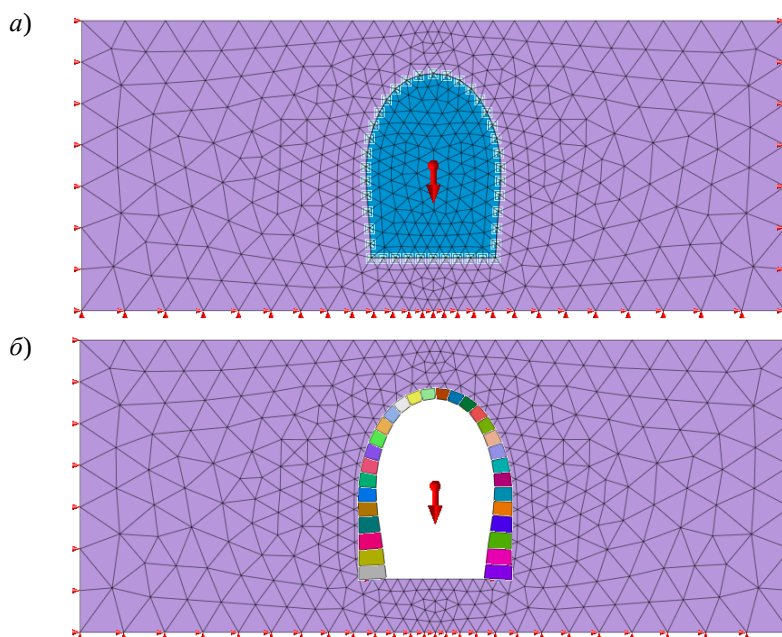


Рис. 5. Расчетная модель обделки тоннеля подковообразного очертания, созданная вторым методом:
 а – стадия моделирования поля начально-напряженно-деформированного состояния грунта;
 б – стадия моделирования экскавации выработки и мгновенного монтажа обделки тоннеля

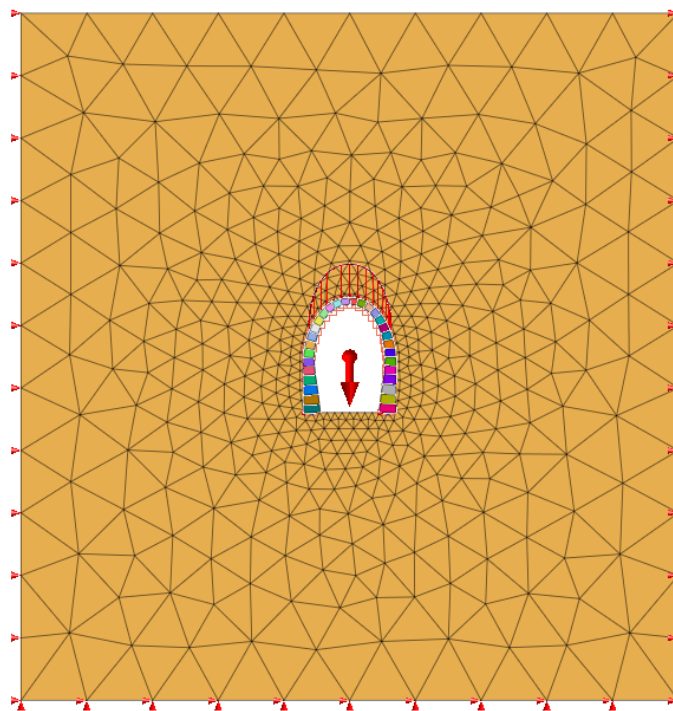


Рис. 6. Расчетная модель обделки тоннеля подковообразного очертания, созданная смешанным методом

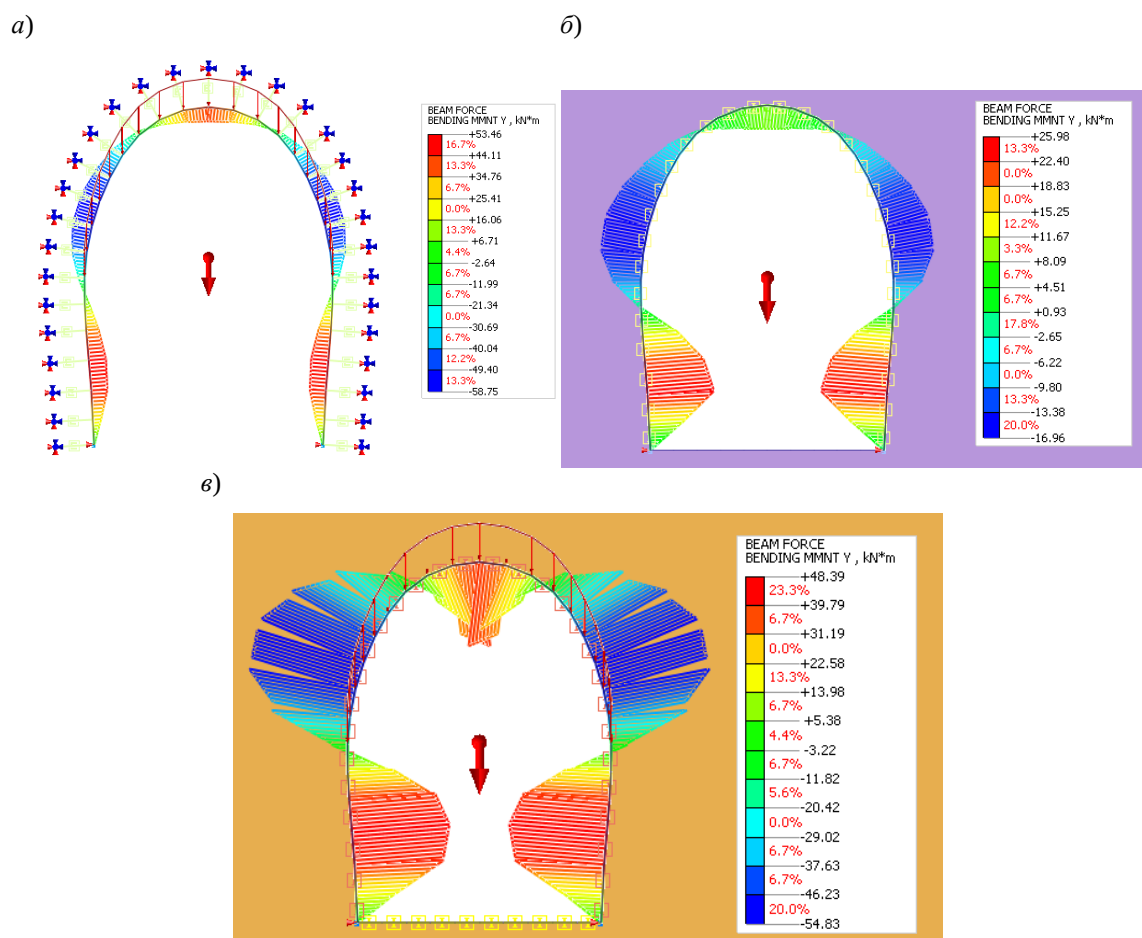


Рис. 7. Эпюры изгибающих моментов в обделке тоннеля подковообразного очертания, полученная по первому (а), второму (б), смешанному (в) методам

Экстремальные усилия в обделке в зависимости от метода расчета и сечения выработки

Выработка	Метод	Усилие в обделке			
		max N , кН	min N , кН	max M , кН·м	min M , кН·м
Круговое очертание	Первый	–81,60	–196,50	25,47	–20,94
	Второй	–90,70	–128,24	7,51	–7,00
	Смешанный	–84,20	–184,33	23,35	–19,75
Подковообразное очертание	Первый	–63,10	–358,10	53,46	–58,76
	Второй	–14,82	–198,68	25,98	–16,96
	Смешанный	–65,77	–355,80	48,39	–54,83

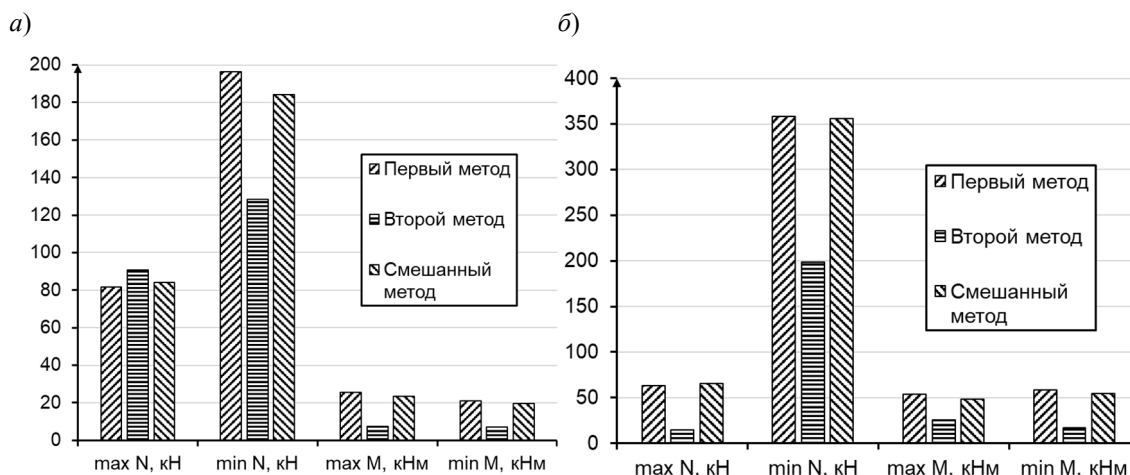


Рис. 8. Абсолютные значения усилий в обделке тоннеля, вычисленные первым, вторым и смешанным методами:

а – обделка кругового очертания; б – обделка подковообразного очертания

Выводы

Анализ результатов исследования показывает, что первый метод является консервативным при расчете обделок транспортных тоннелей.

Смешанный метод может служить альтернативой для подтверждения результатов первого метода, особенно при научно-техническом сопровождении проектной документации.

Список источников

- СП 120.13330.2022. Метрополитены : утверждены приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 27 декабря 2022 г. № 1131/пр : введены в действие с 28 января 2023 г. Москва : Минстрой России, 2022. 302 с.
- СП 122.13330.2023. Тоннели железнодорожные и автодорожные : утверждены приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 20 октября 2023 г. № 760/пр : введены в действие с 21 ноября 2023 г. Москва : Минстрой России, 2023. 101 с.
- СП 248.1325800.2023. Сооружения подземные. Правила проектирования : утверждены приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 9 января 2024 г. № 2/пр : введены в действие с 10 февраля 2024 г. Москва : Российский институт стандартизации, 2024. 63 с.
- Архангельский М. М., Джинчарадзе Д. И., Курисько А. С. Расчет тоннельных обделок. Москва : Трансжелдориздат, 1960. 344 с.
- Даушвили А. П. Расчет тоннельных обделок в матричной форме. Москва : Транспорт, 1972. 120 с.
- Компаниец С. А., Поправко А. К., Богородецкий А. А. Проектирование тоннелей. Москва : Транспорт, 1973. 320 с.
- Орлов С. А. Методы статического расчета сборных железобетонных обделок тоннелей. Москва : Госстройиздат, 1961. 136 с.
- Каган А. А. Расчетные показатели физико-механических свойств грунтов. Назначение, методы определения. Ленинград : Стройиздат, 1973. 144 с.
- Казанов Л. Е., Кузнецов А. О. Границы применимости формулы Б. Г. Галеркина для определения удельного коэффициента упругого отпора при расчете подземных сооружений методами строительной механики // Интеллектуальный потенциал Сибири : 30-я Региональная научная студенческая конференция : материалы конференции : в 4 частях, Новосибирск, 23–27 мая 2022 г. Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2022. Ч. 3. С. 279–282.

10. Мишанов А. А. Об определении коэффициента удельного упругого отпора в задачах геотехнического проектирования // Наука и молодежь XXI века : материалы регионального форума, Новосибирск, 18–28 ноября 2024 г. : в 2 частях. Новосибирск : Сибирский государственный университет путей сообщения, 2025. С. 20–25.
11. ГОСТ 12248.3–2020. Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия : введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 14 октября 2020 г. № 823-ст с 1 июня 2021 г. Москва : Стандартиформ, 2020. 27 с.
12. ГОСТ 12248.4–2020. Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия : введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 14 октября 2020 г. № 824-ст с 1 июня 2021 г. Москва : Стандартиформ, 2020. 15 с.
13. Carranza-Torres C., Fairhurst C. Application of the Convergence-Confinement Method of Tunnel Design to Rock Masses That Satisfy the Hoek-Brown Failure Criterion // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2000. Vol. 15, No. 2. P. 187–213.

References

1. SP 120.13330.2022. Subways. Approved by the Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated 27.12. 2022 No. 1131/pr: introduced on 28.01.2023. Moscow: The Ministry of Construction of Russia; 2022. 302 p. (In Russ.).
2. SP 122.13330.2023. Railways and highway tunnels. Approved by the Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated 20.10. 2023 No. 760/pr: introduced from 21.11.2023. Moscow: Ministry of Construction of Russia; 2023. 101 p. (In Russ.).
3. SP 248.1325800.2023. Underground structures. Design principles. Approved by the Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated 09.01. 2024 No. 2/pr: introduced on 10.02. 2024. Moscow: Russian Institute of Standardization; 2024. 63 p. (In Russ.).
4. Arkhangelsky M. M., Jincharadze D. I., Kurisko A. S. Calculation of tunnel lining. Moscow: Transzheldorizdat; 1960. 344 p. (In Russ.).
5. Daushvili A. P. Calculation of tunnel lining in matrix form. Moscow: Transport; 1972. 120 p. (In Russ.).
6. Companiets S. A., Amendment A. K., Bogorodetsky A. A. Tunnel design. Moscow: Transport; 1973. 320 p. (In Russ.).
7. Orlov S. A. Methods of static calculation of precast reinforced concrete lining tunnels. Moscow: Gosstroyizdat; 1961. 136 p. (In Russ.).
8. Kagan A. A. Calculated indicators of physical and mechanical properties of soils. Purpose, methods of determination. Leningrad: Stroyizdat; 1973. 144 p. (In Russ.).
9. Kazanov L. E., Kuznetsov A. O. The limits of applicability of B.G. Galerkin's formula for determining the specific coefficient of elastic resistance in the calculation of underground structures by methods of structural mechanics. *Intellectual Potential of Siberia. The 30th Regional Scientific Student Conference. Proceedings: in 4 parts. Novosibirsk, May 23–27, 2022. Part 3.* Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2022. P. 279–282. (In Russ.).
10. Mishanov A. A. On determining the coefficient of specific elastic resistance in the tasks of geotechnical design. *Science and Youth of the 21 century. Proceedings of the Regional Forum. In 2 parts, Novosibirsk, November 18–28, 2024.* Novosibirsk: Siberian Transport University; 2025. P. 20–25. (In Russ.).
11. GOST 12248.3–2020. Soils. Determination of strength and deformation parameters by triaxial compression testing. Introduced by the Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated October 14.10.2020 No. 823-st from 01.06. 2021. Moscow: Standartinform; 2020. 27 p. (In Russ.).
12. GOST 12248.4–2020. Soils. Determination of deformation parameters by compression testing. Introduced by the Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated 14.10. 2020 No. 824-st from June 1, 2021. Moscow: Standartinform; 2020. 15 p. (In Russ.).
13. Carranza-Torres C., Fairhurst C. Application of the Convergence-Confinement Method of Tunnel Design to Rock Masses That Satisfy the Hoek-Brown Failure Criterion. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2000;15(2):187–213.

Информация об авторе

А. О. Кузнецов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Геотехника тоннели и метрополитены» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the author

A. O. Kuznetsov – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Geotechnics, Tunnels and Subways Department.

Статья поступила в редакцию 22.10.2025; одобрена после рецензирования 05.12.2025; принята к публикации 12.01.2026.

The article was submitted 22.10.2025; approved after reviewing 05.12.2025; accepted for publication 12.01.2026.

Научная статья
УДК 625.7/.8+625.123
doi:10.52170/1815-9265_2026_78_97

Влияние дисперсного армирования на стойкость асфальтобетонов к пластическому колееобразованию

Юрий Александрович Цибариус¹, Никита Дмитриевич Игнатов^{2✉},
Илья Константинович Ардышев³

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

¹ yustu@yandex.ru

² ndignatov@yandex.ru✉

³ ardyshev.ilya@yandex.ru

Аннотация. Одним из способов повышения стойкости асфальтобетонов к пластическому колееобразованию является дисперсное армирование – введение в их состав различных фиброволокон. Существующими методиками проектирования составов фиброасфальтобетонных смесей определен рекомендуемый диапазон варьирования дозировок данных волокон, при этом их оптимальное процентное содержание устанавливается экспериментально в лабораторных условиях путем проведения серий итерационных подборов и испытаний. Указанные мероприятия выполняются преимущественно последовательно, что приводит к значительным временным и финансовым затратам. Сокращение данных затрат может быть достигнуто путем совершенствования существующей методики проектирования фиброасфальтобетонных смесей – установления функциональных зависимостей, позволяющих определять оптимальное процентное содержание фиброволокон расчетным путем.

В работе поставлен и проведен лабораторный эксперимент по моделированию процессов пластического колееобразования на асфальтобетонных покрытиях с целью определения эмпирических зависимостей средней глубины колеи от процентного содержания полиакрилонитрильных волокон в составе асфальтобетонных смесей и сдвиговой устойчивости битумного вяжущего, входящего в состав этих смесей. Эксперимент состоял из отдельных опытов, каждый из которых заключался в подготовке образцов асфальтобетонных смесей с использованием битумных вяжущих материалов, имеющих различные значения сдвиговой устойчивости, которые определены при максимальной расчетной температуре слоя покрытия для исследуемого региона, и варьированием содержания полиакрилонитрильных волокон. Подготовленные образцы подвергались циклическим нагрузочным воздействиям на специализированной установке моделирования прокатывания нагруженного колеса. В результате экспериментов определены значения параметра, характеризующего стойкость асфальтобетонов к пластическому колееобразованию, – средней глубины колеи.

В итоге установлена функциональная зависимость изменения средней глубины колеи от содержания полиакрилонитрильных волокон и сдвиговой устойчивости битумного вяжущего. Полученные результаты исследования позволяют, при известном значении сдвиговой устойчивости битумного вяжущего, рассчитать оптимальное содержание полиакрилонитрильных волокон для достижения требуемого значения средней глубины колеи в асфальтобетоне.

Ключевые слова: асфальтобетон, вяжущие материалы, пластическая колея, фиброасфальтобетон, стойкость к колееобразованию, средняя глубина колеи, полиакрилонитрильные волокна

Для цитирования: Цибариус Ю. А., Игнатов Н. Д., Ардышев И. К. Влияние дисперсного армирования на стойкость асфальтобетонов к пластическому колееобразованию // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 1 (78). С. 97–102. DOI 10.52170/1815-9265_2026_78_97.

Original article

The influence of dispersed reinforcement on the resistance of asphalt concrete to plastic rutting

Yury A. Tsibarius¹, Nikita D. Ignatov^{2✉}, Ilya K. Ardyshev³

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

¹ yustu@yandex.ru

² ndignatov@yandex.ru✉

³ ardyshev.ilya@yandex.ru

Abstract. One way to increase the resistance of asphalt concrete to plastic rutting is to reinforce it with various types of fiber. Existing methods for designing fiber-reinforced asphalt concrete mixtures specify the recommended range of fiber dosages, with the optimal percentage determined experimentally in laboratory conditions through a series of iterative selections and tests. These activities are mainly carried out sequentially, which leads to significant time and financial costs. These costs can be reduced by improving the existing method for designing fiber-reinforced asphalt concrete mixtures in terms of establishing functional relationships that allow the optimal percentage of fiber content to be determined by calculation.

The paper presents a laboratory experiment on modeling the processes of plastic rutting on asphalt concrete pavements in order to determine the empirical dependencies of the average rut depth on the percentage of polyacrylonitrile fibers in the composition of asphalt concrete mixtures and the shear stability of the bitumen binder included in these mixtures. The experiment consisted of separate tests, each of which involved preparing samples of asphalt concrete mixtures using bituminous binders with different shear stability values determined at the maximum design temperature of the pavement layer for the region under study, and varying the content of polyacrylonitrile fibers. The prepared samples were subjected to cyclic loading on a specialized rolling wheel simulation machine. As a result of the experiments, the values of the parameter characterizing the resistance of asphalt concrete to plastic rutting – the average rut depth – were determined.

The results of the experiment established a functional relationship between the change in average rut depth and the polyacrylonitrile fiber content and shear stability of the bituminous binder. The results of the study allow, given the known shear stability of the bituminous binder, to calculate the optimal content of polyacrylonitrile fibers to achieve the required average rut depth in asphalt concrete.

Keywords: asphalt concrete; binders; plastic rutting; fiber-reinforced asphalt concrete; rutting resistance; average rut depth; polyacrylonitrile fibers

For citation: Tsibarius Yu. A., Ignatov N. D., Ardyshev I. K. The influence of dispersed reinforcement on the resistance of asphalt concrete to plastic rutting. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(78):97–102. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_78_97.

Введение

Предельно допустимая глубина колеи на автомобильных дорогах закреплена в нормативных актах, устанавливающих требования к эксплуатационному состоянию покрытий по условиям обеспечения безопасности дорожного движения. Появление колеи на асфальтобетонных покрытиях – многофакторный процесс, в котором участвуют как пластические деформации покрытия и/или основания, так и процессы механического износа материала покрытия [1–3]. Снижение величины пластического колееобразования достигается путем обеспечения сдвигоустойчивости асфальтобетонных смесей, требуемой по условиям эксплуатации конкретного участка автомобильной дороги.

Согласно действующим нормативным документам устойчивость асфальтобетонов к формированию колеи данного типа определяют посредством измерения показателя «средняя глубина колеи» в ходе лабораторных испытаний [4, 5]. Как отмечено в работах ряда авторов [4, 6–9], ключевым фактором, определяющим свойства асфальтобетона в части его стойкости к пластическому колееобразованию, является сдвиговая устойчивость применяемого битумного вяжущего при максимальной расчетной температуре слоя покрытия. Данный фактор необходимо учитывать при исследованиях процесса изменения сдвигоустойчивости асфальтобетонных смесей.

Одним из вариантов повышения сдвигоустойчивости асфальтобетонных покрытий является их дисперсное армирование, достигаемое, в частности, введением в состав асфальтобетонных смесей различных фиброволокон [10]. Данный способ позволяет повысить характеристики сдвигоустойчивости асфальтобетонной смеси без корректировки ее состава – используемого каменного материала и битумного вяжущего. Однако существующая методика проектирования составов армированных асфальтобетонных смесей имеет существенный недостаток, который заключается в отсутствии расчетной методики определения оптимального содержания фиброволокон, необходимого для достижения требуемой сдвигоустойчивости асфальтобетонной смеси. Целью данной работы является получение функциональной зависимости изменения средней глубины колеи от содержания полиакрилонитрильных волокон (ПА-волокон) и сдвиговой устойчивости битумного вяжущего при максимальной расчетной температуре слоя покрытия для исследуемого региона 64 °С (далее – сдвиговой устойчивости битумного вяжущего материала).

Методика исследования

Для оценки степени и характера влияния процентного содержания ПА-волокон на устойчивость асфальтобетонов к образованию пластических деформаций исследовалась горячая асфальтобетонная смесь А16Вт, широко

применяемая в природно-климатических условиях Западной Сибири для дорог с тяжелыми условиями движения. Состав исследуемой смеси представлен в табл. 1.

Таблица 1

Состав асфальтобетонной смеси А16Вт

Материал	Содержание в смеси, %
Минеральная часть смеси по фракциям (песок дробленый, щебень из диабазы), мм:	
0–4	43,1
4–8	23,3
8–16	29,6
Битумный вяжущий материал PG 64-40	4,0 (в 100 %)
ПА-волокна	От 0 до 0,5 (сверх 100 % минеральной части)

Эксперимент состоял из отдельных опытов, каждый из которых заключался в подготовке образцов из асфальтобетонных смесей (рис. 1) с использованием битумных вяжущих материалов различных партий, отличающихся значениями сдвиговой устойчивости (фактор Y), и варьированием содержания ПА-волокон (фактор X). Матрица планирования эксперимента представлена в табл. 2.



Рис. 1. Изготовленный контрольный образец-плита

Испытания выполнялись для двух контрольных образцов каждого исследуемого состава асфальтобетонной смеси. Подготовленные образцы подвергались предварительному термостатированию на воздухе внутри испытатель-

ной установки прокатывания нагруженного колеса (рис. 2) при температуре $65 \pm 1^\circ\text{C}$, выбранной в соответствии с нормативными требованиями для максимальной расчетной температуры слоя покрытия для исследуемого региона (64°C). Далее посредством возвратно-поступательного циклического воздействия нагруженного колеса с шиной на исследуемый образец асфальтобетона создавались условия для возникновения колеи на его поверхности. Испытания продолжались в течение 10 000 циклов нагрузки (20 000 прокатываний колеса) или до образования колеи на одном из испытуемых образцов глубиной более 15 мм. Глубина колеи регистрировалась испытательной установкой в режиме реального времени и вносилась в базу данных проводимого испытания. Итоговая средняя глубина колеи определялась после окончания испытания как среднеарифметическое значение глубины колеи двух испытуемых образцов, полученных из одной асфальтобетонной смеси.

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента

Значение фактора X , %	Номер опыта при значении фактора Y , кПа				
	1,91	2,02	2,15	2,25	2,39
0,30	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
0,35	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
0,40	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5
0,45	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5
0,50	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5



Рис. 2. Вид установки для испытания прокатыванием нагруженного колеса

Результаты исследования

Результаты определения средней глубины колеи PRD , мм, полученные в ходе проведения лабораторных экспериментов, приведены в табл. 3.

На основании статистической обработки полученных экспериментальных данных установлена зависимость средней глубины колеи от содержания ПА-волокон и сдвиговой устойчивости битумного вяжущего материала, представленная на рис. 3 в виде поверхности влияния.

В результате статистической обработки данных определена функциональная эмпирическая зависимость изменения средней глубины колеи от сдвиговой устойчивости битумного вяжущего материала и содержания ПА-волокон:

$$PRD = 15,4823 + 3,5484y - 9,796y - 5,6571x^2 - 0,6356xy + 2,0632y^2,$$

где PRD – значение средней глубины колеи, мм; y – сдвиговая устойчивость битумного вяжущего материала, кПа; x – содержание ПА-волокон, %.

Заключение

В результате проведенных исследований отмечено снижение величины средней глубины колеи при увеличении дозировки полиакрилонитрильных волокон в асфальтобетонной смеси. При этом для достижения нормативного значения средней глубины колеи для исследуемого асфальтобетона А16Вт требуется добавление: 0,3 % полиакрилонитрильных волокон – при сдвиговой устойчивости битумного вяжущего

Таблица 3

Результаты определения значений показателя «средняя глубина колеи»

Опыт	PRD	Опыт	PRD	Опыт	PRD	Опыт	PRD	Опыт	PRD
1.1	4,54	2.1	4,44	3.1	4,37	4.1	4,19	5.1	3,98
1.2	4,23	2.2	4,15	3.2	4,07	4.2	3,97	5.2	3,82
1.3	4,11	2.3	4,04	3.3	3,94	4.3	3,81	5.3	3,68
1.4	4,01	2.4	3,94	3.4	3,84	4.4	3,72	5.4	3,54
1.5	3,97	2.5	3,87	3.5	3,75	4.5	3,64	5.5	3,41

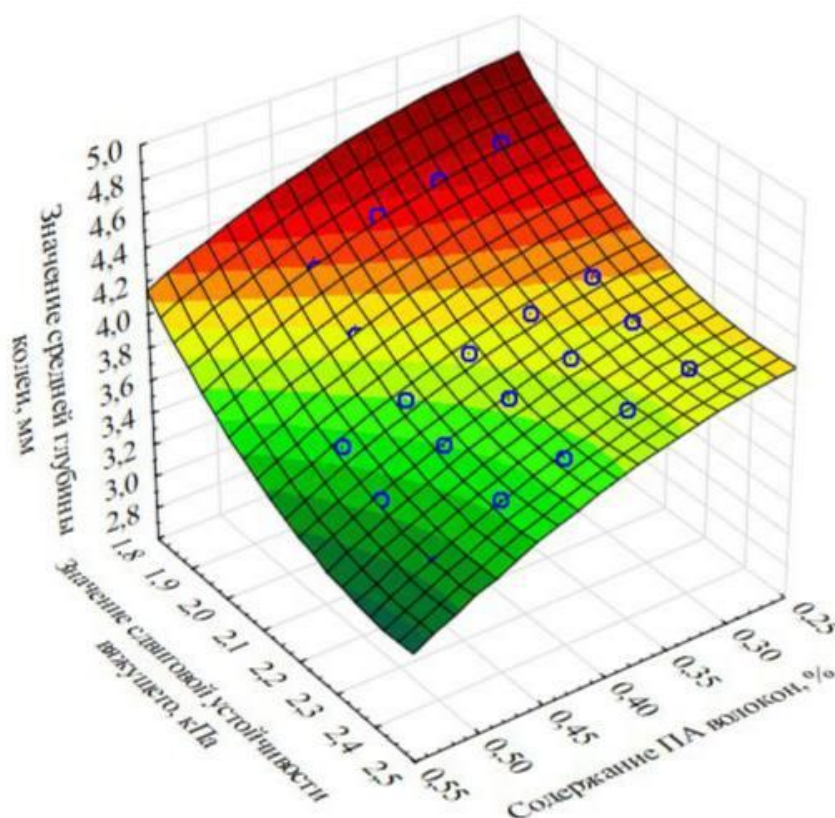


Рис. 3. Зависимость средней глубины колеи от содержания ПА-волокон и сдвиговой устойчивости битумного вяжущего материала

материала 2,39 кПа; 0,5 % полиакрилонитрильных волокон – при сдвиговой устойчивости битумного вяжущего материала 1,91 кПа. Таким образом, оптимальное содержание полиакрилонитрильных волокон является переменным параметром и зависит от сдвиговой устойчивости битумного вяжущего материала, входящего в состав асфальтобетонной смеси.

По результатам эксперимента установлена функциональная зависимость изменения средней глубины колеи асфальтобетонной смеси от содержания полиакрилонитрильных воло-

кон и значения сдвиговой устойчивости битумного вяжущего материала. Полученные результаты исследования могут быть использованы для расчетного определения оптимального содержания полиакрилонитрильных волокон в асфальтобетонной смеси А16Вт как на этапе подбора ее состава, так и для внесения оперативных корректировок состава на этапе ее выпуска в зависимости от изменения значений сдвиговой устойчивости вяжущих материалов различных партий, поступающих на производство.

Список источников

1. Конорева О. В., Муравьев Ю. А. Анализ современных методов повышения устойчивости асфальтобетонных покрытий к колееобразованию // Инженерный вестник Дона. 2016. № 4 (43). С. 136. EDN VYBWGI.
2. Mijoski G. Rut appearance on pavement surface and measurements on motorway A-4 in Macedonia // International Scientific Conference People, Buildings and Environment. Kromeriz, Czech Republic, 2014. P. 296–305.
3. Костельнов М. П., Перевалов В. П., Пахаренко Д. В. Практика борьбы с колеей асфальтобетонных покрытий может быть успешной // Дорожная техника. 2011. № 2. С. 54–70.
4. Стойкость асфальтобетонов к образованию пластической колеи в зависимости от сдвиговой устойчивости вяжущих материалов / Ю. А. Цибариус, А. Л. Ланис, А. Н. Бердюгин, М. А. Разуваев // Мир транспорта. 2024. Т. 22, № 2 (111). С. 34–39. DOI 10.30932/1992-3252-2024-22-2-4. EDN BUILED.
5. Evaluation of the Rutting Performance of the Field Specimen Using the Hamburg Wheel-Tracking Test and Dynamic Modulus Test / D. Xiongwei, J. Yanshun, W. Shaoquan, G. Ying // Advances in Civil Engineering. 2020. Vol. 1. P. 1–15.
6. Ziari H., Shirini B., Imaninasab R. Rutting evaluation of rubberized and SBS modified porous asphalt mixtures // Engineering Solid Mechanics. 2015. Vol. 3. P. 253–262.
7. О модификации битумов и асфальтобетонных смесей для повышения сдвигоустойчивости асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог / Т. И. Левкович, А. И. Беляков, А. Е. Билько, А. С. Тищенко // Приволжский научный вестник. 2016. № 1 (53). С. 48–53. EDN VJLTHR.
8. Кирюхин Г. Н. Сдвигоустойчивость щебеночно-мастичного асфальтобетона // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2008. № 40. С. 76–79. EDN NUZDXF.
9. Чернов С. А., Чирва Д. В., Леконцев Е. В. Влияние полимерно-битумного вяжущего на процессы колееобразования в верхних слоях покрытий автомобильных дорог // Науковедение. 2012. № 4 (13). С. 226. EDN PVXHPX.
10. Игнатов Н. Д. О целесообразности и направлении исследований использования фиброволокон при проектировании составов асфальтобетонных смесей // Политранспортные системы : материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Новосибирск, 24–25 октября 2024 г. Новосибирск : Сибирский государственный университет путей сообщения, 2024. С. 36–39. EDN LRIJX.

References

1. Konoreva O. V., Muravyov Yu. A. Analysis of modern methods for improving the resistance of asphalt concrete pavements to rutting. *Don Engineering Bulletin*. 2016;(43):136. (In Russ.). EDN VYBWGI.
2. Mijoski G. Rut appearance on pavement surface and measurements on motorway A-4 in Macedonia. *International Scientific Conference People, Buildings and Environment*. Kromeriz, Czech Republic; 2014. P. 296–305.
3. Kostelnov M. P., Perevalov V. P., Pakhareno D. V. Practical measures to combat rutting in asphalt concrete pavements can be successful. *Road Technology*. 2011;(2):54–70. (In Russ.).
4. Tsibarius Yu. A., Lanis A. L., Berdyugin A. N., Razuvaev M. A. Resistance of asphalt concrete to plastic rutting depending on the shear stability of binding materials. *World of Transport*. 2024;22(111):34–39. (In Russ.). DOI 10.30932/1992-3252-2024-22-2-4. EDN BUILED.
5. Xiongwei D., Yanshun J., Shaoquan W., Ying G. Evaluation of the Rutting Performance of the Field Specimen Using the Hamburg Wheel-Tracking Test and Dynamic Modulus Test. *Advances in Civil Engineering*. 2020;(1):1–15.

6. Ziari H., Shirini B., Imaninasab R. Rutting evaluation of rubberized and SBS modified porous asphalt mixtures. *Engineering Solid Mechanics*. 2015;(3):253–262.
7. Levkovich T. I., Belyakov A. I., Bilko A. E., Tishchenko A. S. On the modification of bitumens and asphalt concrete mixtures to increase the shear resistance of asphalt concrete pavements of motor roads. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2016;(53):48–53. (In Russ.). EDN VJLTHR.
8. Kiryukhin G. N. Shear resistance of crushed stone-mastic asphalt concrete. *Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University*. 2008;(40):76–79. (In Russ.). EDN NUZDXF.
9. Chernov S. A., Chirva D. V., Lekontsev E. V. Influence of polymer-bitumen binder on rutting processes in the upper layers of road pavements. *Internet Journal of Science Studies*. 2012;(13):226. (In Russ.). EDN PVXHPX.
10. Ignatov N. D. On the feasibility and direction of research into the use of fiber reinforcements in the design of asphalt concrete mixtures. *Political Transport Systems: Proceedings of the XIII All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation, Novosibirsk, October 24–25, 2024*. Novosibirsk: Siberian Transport University; 2024. P. 36–39. (In Russ.). EDN LRIJXX.

Информация об авторах

Ю. А. Цибариус – кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Контроль качества дорожных одежд и земляного полотна» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Н. Д. Игнатов – аспирант кафедры «Путь и путевое хозяйство», ведущий инженер научно-исследовательской лаборатории «Контроль качества дорожных одежд и земляного полотна» Сибирского государственного университета путей сообщения.

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

Information about the authors

Yu. A. Tsibarius – Candidate of Engineering, Senior Researcher of the Quality Control of Pavements and Subgrades Laboratory, Siberian Transport University.

N. D. Ignatov – Postgraduate, Leading Engineer of the Quality Control of Pavements and Subgrades Laboratory, Siberian Transport University.

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

Статья поступила в редакцию 25.09.2025; одобрена после рецензирования 01.12.2025; принята к публикации 26.01.2026.

The article was submitted 25.09.2025; approved after reviewing 01.12.2025; accepted for publication 26.01.2026.

Научная статья

УДК 624.131

doi:10.52170/1815-9265_2026_78_103

Оценка надежности фундамента по осадке многослойного основания

Александр Михайлович Караулов¹, Константин Валерьевич Королев^{2✉},
Константин Алексеевич Федосин³, Валерия Сергеевна Королева⁴

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

³ «Эм-Си Баухеми», Санкт-Петербург, Россия

¹ karaulov_am@mail.ru

² korolev_kv@mail.ru✉

³ konstantin.fedosin@mc-bauchemie.ru

⁴ lera.makarova.2011@mail.ru

Аннотация. Повышение качества проектных решений фундаментной части зданий и сооружений неразрывно связано с оценкой их надежности. Однако методы такой оценки разработаны к настоящему времени совершенно недостаточно. Принятый в отечественном фундаментостроении принцип проектирования по предельным состояниям оперирует понятием расчетных значений нагрузки и характеристик грунтов. Также здесь присутствует понятие надежности в виде коэффициентов надежности по нагрузке и коэффициентов надежности по грунту. Эти коэффициенты являются оценкой методов определения отдельных параметров. В то же время понятие надежности в принципе означает безотказность работы всей системы, в данном случае – фундамента сооружения и грунтового массива. Вероятность оценки надежности, называемая уровнем надежности, предполагает наличие условий, которым должно отвечать проектное решение. Как правило, это условия по несущей способности и по деформациям основания. Вероятность выполнения данных условий, которые рассматриваются как заданные функции случайных величин, будет характеризовать надежность фундаментной конструкции.

Порядок действий по определению уровня надежности состоит в следующем. Во-первых, устанавливаются случайные параметры проверяемого условия и их числовые характеристики до центральных моментов четвертого порядка. Во-вторых, рассчитываются числовые характеристики условия, как случайной функции, предварительно линеаризованной. И в-третьих, рассчитывается вероятность выполнения условия с использованием произвольного закона распределения в виде ряда Шарлье. Такой подход к оценке надежности фундаментных конструкций достаточно обоснован и может использоваться в практике проектирования. Было рассмотрено применение этого метода для оценки надежности грунтового основания по несущей способности и по деформациям. Однако в последних редакциях нормативных документов метод расчета осадки был существенно изменен. Цель настоящей статьи заключалась в изложении алгоритма оценки надежности модернизированного метода расчета осадки грунтовых оснований.

Ключевые слова: оценка надежности, расчет осадки, метод послойного суммирования

Для цитирования: Караулов А. М., Королев К. В., Федосин К. А., Королева В. С. Оценка надежности фундамента по осадке многослойного основания // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 1 (78). С. 103–108. DOI 10.52170/1815-9265_2026_78_103.

Original article

Evaluation of foundation reliability based on the settlement of a multi-layer base

Alexander M. Karaulov¹, Konstantin V. Korolev^{2✉}, Konstantin A. Fedosin³,
Valeria S. Koroleva⁴

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

³ MC Bauchemie, Saint Petersburg, Russia

¹ karaulov_am@mail.ru

² korolev_kv@mail.ru✉

³ konstantin.fedosin@mc-bauchemie.ru

⁴ lera.makarova.2011@mail.ru

Abstract. Improving the quality of foundation design solutions for buildings and structures is inextricably linked to assessing their reliability. However, methods for such assessment have been vastly underdeveloped to date.

The principle of limit state design adopted in domestic foundation engineering relies on the concept of design load values and soil characteristics. This concept also includes reliability factors in the form of load and soil reliability factors. These factors represent estimates of the methods used to determine individual parameters. At the same time, reliability, in principle, implies the failure-free operation of the entire system - in this case, the structure's foundation and soil mass. The probability of assessing reliability, known as the reliability level, presupposes the presence of conditions that the design solution must meet. Typically, these conditions relate to bearing capacity and foundation deformations. The probability of meeting these conditions, which are considered as specified functions of random variables, characterizes the reliability of the foundation structure.

The procedure for determining the reliability level is defined as follows. First, the random parameters of the condition being tested and their numerical characteristics up to the fourth-order central moments are established. Second, the numerical characteristics of the condition are calculated as a random function, previously linearized. Third, the probability of the condition being satisfied is calculated using an arbitrary distribution law in the form of a Charlier series. This approach to assessing the reliability of foundation structures is sufficiently justified and can be used in design practice. The application of this method was considered for assessing the reliability of soil foundations based on bearing capacity and deformation. However, in recent revisions of regulatory documents, the settlement calculation method has been significantly modified. The purpose of this article was to present an algorithm for assessing the reliability of the modernized method for calculating the settlement of soil foundations.

Keywords: reliability assessment, settlement calculation, layer-by-layer summation method

For citation: Karaulov A. M., Korolev K. V., Fedosin K. A., Koroleva V. S. Evaluation of foundation reliability based on the settlement of a multi-layer base. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(78):103–108. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_78_103.

Введение

Оценка надежности грунтовых оснований представляется необходимым дополнением расчетов по предельным состояниям при проектировании фундаментной части зданий и сооружений [1, 2]. Проверка оснований по деформациям и несущей способности выполняется с использованием расчетных значений деформационных характеристик грунтов. Эти значения устанавливаются в рамках нормального закона распределения. При таком подходе учитывается влияние случайных факторов на формирование физико-механических свойств грунтов. Однако остается открытым вопрос о взаимовлиянии случайных процессов в работе неоднородных грунтовых массивов как единой системы, взаимодействующей с инженерным сооружением. Решение именно этого вопроса возможно с помощью методики определения уровня систем, работа которых обусловлена аргументами случайного характера [3–7]. При этом допускается произвольный закон распределения. В данной статье приводится алгоритм расчета уровня надежности грунтового основания по осадке применительно к модернизированному методу послойного суммирования. Проверка по осадке основания является основной для большинства промышленных и гражданских зданий и сооружений.

Теоретические исследования

Согласно СНиП 2.02.01–83* [8] расчет осадки многослойных зданий и сооружений должен выполняться методом послойного суммирования. С 2011 г. нормативными доку-

ментами по проектированию оснований принят модернизированный вариант этого метода, актуальный вариант изложен в [9]. Согласно этому методу осадка от действующего по подошве фундамента расчетного давления p реализуется в пределах активной зоны сжатия мощностью H_c . Эта зона разбивается на расчетные слои, сжатие которых в сумме дает искомую величину осадки. Формула для расчета осадки имеет вид

$$s = 0,8 \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zp,i} - \sigma_{z\gamma,i}}{E_i} h_i + 0,8 \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{z\gamma,i}}{5E_i} h_i, \quad (1)$$

где n – количество расчетных слоев в пределах активной зоны сжатия; $\sigma_{zp,i} = \alpha p$ – вертикальное напряжение в середине расчетного слоя от расчетного давления; $\sigma_{z\gamma,i} = \bar{\alpha} \sigma_{zg,0}$ – вертикальное напряжение в середине расчетного слоя от бытового давления $\sigma_{zg,0}$, действовавшего по дну котлована до его разработки; E_i – модуль деформации грунта в пределах расчетного слоя; h_i – толщина расчетного слоя.

Коэффициенты рассеивания напряжений α и $\bar{\alpha}$ для прямоугольной загруженной площадки даются формулой

$$\alpha = \frac{2}{\pi} \left[\frac{abz(a^2 + b^2 + 2z^2)}{(a^2 + z^2)(b^2 + z^2)\sqrt{a^2 + b^2 + z^2}} + \arctg \frac{ab}{\sqrt{a^2 + b^2 + z^2}} \right]. \quad (2)$$

В этой формуле a и b есть длина и ширина подошвы фундамента при вычислении α , длина и ширина дна котлована при вычислении $\bar{\alpha}$;

z – глубина расположения рассматриваемой точки от подошвы фундамента.

Мощность активной зоны сжатия H_c определяется условием на ее нижней границе:

$$\sigma_{zp} = 0,5\sigma_{zg}. \quad (3)$$

Основной характеристикой, определяющей осадку основания, является модуль деформации грунта. Значение модуля деформации – величина случайная. Осадка многослойного основания есть функция случайных величин (модулей деформации) и также является случайной величиной [4]. Поэтому при оценке осадки основания целесообразно учитывать ее случайный характер.

Для выполнения оценки основания как случайной величины преобразуем формулу для ее определения к виду

$$s = \sum_{i=1}^k \frac{B_i}{E_i}. \quad (4)$$

Здесь суммирование ведется по различным слоям грунта. Число k есть количество инженерно-геологических элементов (ИГЭ), попадающих в сжимаемую толщу грунта ($i = 1, \dots, k$). Каждый слой грунта характеризуется координатами кровли z_i и подошвы z_{i+1} . Соответственно, E_i – модуль деформации i -го слоя, а величина B_i определяется для этого слоя следующим образом:

$$B_i = 0,8pA_i - 0,64\sigma_{zg0}\bar{A}_i, \quad (5)$$

$$A_i = \int_{z_i}^{z_{i+1}} \alpha dz, \quad \bar{A}_i = \int_{z_i}^{z_{i+1}} \bar{\alpha} dz,$$

где A_i и $\bar{A}_i$ – площади эпюр коэффициента рассеивания напряжений в пределах i -го слоя для определения напряжений от расчетной нагрузки и бытового давления в уровне подошвы фундамента.

Для определения числовых характеристик случайной величины s эти характеристики устанавливаются для каждого модуля деформации E_i , а именно – математическое ожидание m_{Ei} , дисперсия D_{Ei} , центральный момент третьего порядка μ_{3Ei} и центральный момент четвертого порядка μ_{4Ei} . Точка математического ожидания в пространстве $(E_1, \dots, E_k)$ определяется координатами $(m_{E1}, \dots, m_{Ek})$.

Числовые характеристики устанавливаются для линеаризованного уравнения, определяющего осадку s , имеющего вид [10]:

$$s = m_s + \sum_{i=1}^k S'_{mi}(E_i - m_{Ei}). \quad (6)$$

Математическое ожидание s , обозначенное символом m_s , вычисляется для указанной точки математических ожиданий:

$$m_s = \sum_{i=1}^k \frac{B_i}{m_{Ei}}. \quad (7)$$

Для этой же точки определяются частные производные осадки по модулям деформации:

$$S'_{mi} = -\frac{B_i}{m_{Ei}^2}. \quad (8)$$

Остальные числовые характеристики (дисперсия D_s , центральные моменты третьего μ_{3s} и четвертого μ_{4s} порядков) даются выражениями:

$$D_s = \sum_{i=1}^k S'^2_{mi} D_{Ei};$$

$$\mu_{3s} = \sum_{i=1}^k S'^3_{mi} \mu_{3Ei}; \quad (9)$$

$$\mu_{4s} = \sum_{i=1}^k S'^4_{mi} \mu_{4Ei} + 6 \sum_{i < j} S'^2_{mi} D_{Ei} S'^2_{mj} D_{Ej}.$$

Для оценки надежности фундамента по осадке необходимо сформулировать условие, которому должна отвечать расчетная осадка. Примем традиционное условие: осадка s не должна превышать предельной величины s_u . Соответственно, запишем выражение для случайной величины Y :

$$Y = s - s_u. \quad (10)$$

Уровень надежности H по осадке есть вероятность того, что случайная величина Y будет меньше нуля. Предельная осадка s_u есть константа, так что ее математическое ожидание равно самой величине, а все центральные моменты равны нулю. Тогда числовые характеристики случайной величины Y определяются формулами:

$$m_y = m_s - s_u; \quad D_y = D_s;$$

$$\mu_{3y} = \mu_{3s}; \quad \mu_{4y} = \mu_{4s}. \quad (11)$$

Кроме того, для этой случайной величины вычисляются среднее квадратическое отклонение, коэффициент асимметрии и эксцесс:

$$\sigma_y = \sqrt{D_y}, \quad A_y = \frac{\mu_{3y}}{\sigma_y^3}, \quad E_y = \frac{\mu_{4y}}{\sigma_y^4} - 3. \quad (12)$$

Интегральная функция распределения случайной величины Y записывается с помощью ряда Шарлье [5, 6]:

$$F(y) = \frac{1}{2}[1 + \Phi(z)] - \frac{\varphi_0(z)}{6} \left[A_y(z^2 - 1) + \frac{1}{4} E_y(z^3 - 3z) \right], \quad (13)$$

где $\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{\xi^2}{2}} d\xi$ – функция Лапласа;

$$z = \frac{y - m_y}{\sigma_y}; \quad \varphi_0(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}}.$$

Соответственно, при $y = 0$ аргумент $z = -\frac{m_y}{\sigma_y}$ и $F(0)$ есть искомая величина вероятности выполнения условия по осадке, т. е. уровня надежности расчета.

Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрим пример расчета. На рисунке приведена схема к определению осадки методом послойного суммирования.

На основание действует расчетная нагрузка от фундамента с прямоугольной подошвой (ширина $b = 6$ м, длина $a = 11$ м), имеющего глубину заложения 2 м. Удельный вес грунта, залегающего выше подошвы фундамента, равен $\gamma' = 17,9$ кН/м³. Основание на глубину активной зоны сжатия $H_c = 10$ м представлено тремя слоями грунта:

- ИГЭ №1 мощностью 3 м, удельный вес $\gamma = 17,7$ кН/м³;
- ИГЭ №2 мощностью 4 м, удельный вес $\gamma = 16,9$ кН/м³;
- ИГЭ №3 мощностью 3 м, удельный вес $\gamma = 18,1$ кН/м³.

На схеме показаны эпюры напряжений σ_{zg} , σ_{zg} . На нижней границе зоны сжатия ($H_c = 10$ м) выполняется условие $0,5\sigma_{zg} \approx \sigma_{zp} = 105$ кПа при $p = 442$ кПа.

Частные значения модулей деформации инженерно-геологических элементов, как случайных величин, приведены в табл. 1.

В табл. 2 даны значения числовых характеристик модулей деформации – математических ожиданий, дисперсий и центральных моментов третьего и четвертого порядков.

В табл. 3 сведены значения расчетных параметров A_i , $\bar{A}_i$, B_i , S'_{mi} из формул (3)–(5).

Далее по формулам (7) и (9) рассчитываются числовые характеристики случайной величины s :

$$m_s = \sum_{i=1}^3 \frac{B_i}{m_{Ei}} = 0,1984;$$

$$D_s = \sum_{i=1}^3 S_{mi}^{\prime 2} D_{Ei} = 2,521 \cdot 10^{-5};$$

$$\mu_{3s} = \sum_{i=1}^3 S_{mi}^{\prime 3} \mu_{3Ei} = 5,9 \cdot 10^{-9};$$

$$\mu_{4s} = \sum_{i=1}^3 S_{mi}^{\prime 4} \mu_{4Ei} + 6 \sum_{i < j} S_{mi}^{\prime 2} D_{Ei} S_{mj}^{\prime 2} D_{Ej} = 1,343 \cdot 10^{-9}.$$

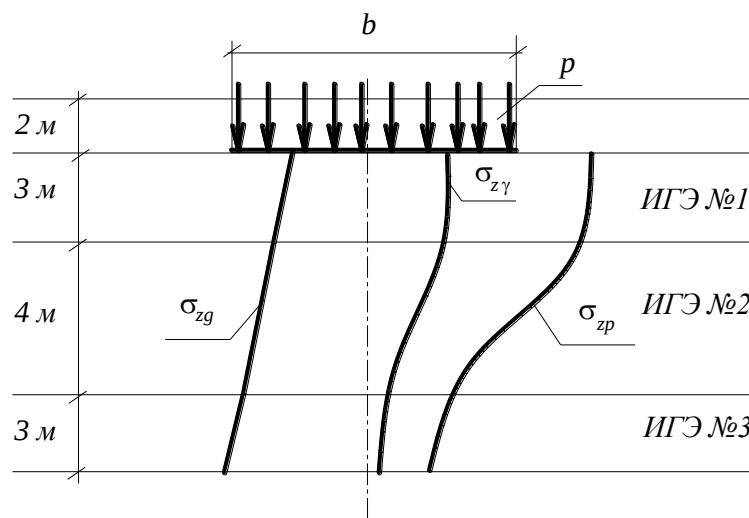
Принимая значение допустимой осадки $s_u = 0,2$ согласно формулам (11), имеем числовые характеристики случайной величины y :

$$m_y = m_s - s_u = -1,624 \cdot 10^{-3};$$

$$D_y = D_s = 2,521 \cdot 10^{-5};$$

$$\mu_{3y} = \mu_{3s} = 5,9 \cdot 10^{-9};$$

$$\mu_{4y} = \mu_{4s} = 1,343 \cdot 10^{-9}.$$



Расчетная схема к определению осадки основания

Таблица 1

Выборки случайных величин – модулей деформации E_1, E_2, E_3 , кПа

Модуль деформации	1	2	3	4	5	6
E_1	14 000	13 500	14 200	13 600	13 100	14 600
E_2	8 100	8 200	7 980	7 450	7 760	7 470
E_3	12 000	11 400	13 300	10 900	11 680	12 400

Таблица 2

Числовые характеристики случайных величин E_1, E_2, E_3

Грунт	m_{Ei} , кПа	D_{Ei} , кПа ²	μ_{3Ei} , кПа ³	μ_{4Ei} , кПа ⁴
Слой 1 ($i = 1$)	$1,383 \cdot 10^4$	$2,907 \cdot 10^5$	$1,008 \cdot 10^7$	$1,115 \cdot 10^{11}$
Слой 2 ($i = 2$)	$0,7827 \cdot 10^4$	$1,022 \cdot 10^5$	$-0,3841 \cdot 10^7$	$0,1032 \cdot 10^{11}$
Слой 3 ($i = 3$)	$1,195 \cdot 10^4$	$7,011 \cdot 10^5$	$1,195 \cdot 10^4$	$7,819 \cdot 10^{11}$

Таблица 3

Значения расчетных параметров $A_i, \bar{A}_i, B_i, S'_{mi}$

Грунт	A_i	$\bar{A}_i$	B_i	S'_{mi}
Слой 1 ($i = 1$)	2,803	2,856	925,7	-4,838
Слой 2 ($i = 2$)	2,285	2,542	749,7	-1,224
Слой 3 ($i = 3$)	0,9189	1,089	300,0	-2,102

Кроме того, для этой случайной величины по формулам (12) устанавливаем среднее квадратическое отклонение, коэффициент асимметрии и эксцесс:

$$\sigma_y = \sqrt{D_y} = \sqrt{2,521 \cdot 10^{-9}} = 2,208 \cdot 10^{-3};$$

$$A_y = \frac{\mu_{3y}}{\sigma_y^3} = \frac{5,9 \cdot 10^{-9}}{2,208^3 \cdot 10^{-9}} = 0,04661;$$

$$E_y = \frac{\mu_{4y}}{\sigma_y^4} - 3 = \frac{1,343 \cdot 10^{-9}}{2,208^4 \cdot 10^{-12}} - 3 = -0,8861.$$

Располагая вычисленными характеристиками и принимая $z = 0,3235$ при $y = 0$, по формуле (13) рассчитываем уровень надежности $H = F(0) = 0,6163$. Заметим, что условие по осадке выполняется: $s = 0,198 < s_u = 0,2$, однако надежность оценки мала – 0,6163. В данном случае это не представляет большой опасности, поскольку, например, при снижении расчетного давления с 442 до 420 кПа надеж-

ность резко увеличивается до 0,98. Данный пример наглядно иллюстрирует, что вычисление уровня надежности дает полезную информацию для оценки и корректировки проектных решений.

Выводы

Таким образом, используя достаточно компактный математический инструментарий, можно выйти на оценку надежности при проектировании оснований, фундаментов и в целом строительных конструкций. Применение предложенного в статье алгоритма очевидным образом позволит качественно лучше оценивать надежность проектных решений, фактически переходя от оценки «по опыту» (что тоже нельзя сбрасывать со счетов) к количественной оценке, базирующейся на фундаментальных законах теории вероятности и строгих методах математической статистики.

Список источников

1. Силян Я. В. О применении теории катастроф к оценке надежности оборудования нефтегазового комплекса // Северный регион: наука, образование, культура. 2013. № 2 (28). С. 62–69.
2. Уткин В. С. Оценка надежности и несущей способности строительных конструкций на основе теории нечетких множеств и теории возможностей : специальность 05.23.17 «Строительная механика» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Уткин Владимир Сергеевич. 2002. 395 с.
3. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности. Основные характеристики надежности и их статистический анализ : монография. Издание 2-е, исправленное и

дополненное. Москва : ЛИБРОКОМ, 2012. 582 с. (Сер. Физико-математическое наследие : математика (теория вероятностей)).

4. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Прикладные задачи теории вероятностей. Москва : Радио и связь, 1983. 416 с.

5. Пугачев В. С., Синицын И. Н. Структурная теория сложных стохастических систем // Информатика и ее применения. 2011. Т. 2 (5). С. 4–16.

6. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. Москва : Юрайт, 2003. 427 с.

7. СНиП 2.02.01–83*. Основания зданий и сооружений. Москва : ЦПП, 2006. 48 с.

8. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений : актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83*. Москва : Стандартинформ, 2016. 228 с.

9. Ермолаев Н. Н., Михеев В. В. Надежность оснований сооружений. Ленинград : Стройиздат, Ленинградское отделение, 1976. 152 с.

10. Караулов А. М., Королев К. В., Федосин К. А. Определение уровня надежности условия по осадке грунтового основания // Гидроэнергетика. Гидротехника. Новые разработки и технологии : тезисы докладов шестнадцатой научно-технической конференции. Санкт-Петербург : ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2024. С. 148–150.

References

1. Silin Ya. V. On the application of catastrophe theory to assessing the reliability of oil and gas complex equipment. *Northern Region: Science, Education, Culture*. 2013;(28):62–69. (In Russ.).

2. Utkin V. S. Assessment of reliability and bearing capacity of building structures based on the theory of fuzzy sets and possibility theory: specialty 05.23.17 ‘Structural Mechanics’. Dissertation for the Degree of Doctor of Engineering. Utkin Vladimir Sergeevich. 2002. 395 p. (In Russ.).

3. Gnedenko B. V., Belyaev Yu. K., Soloviev A. D. Mathematical methods in reliability theory. main reliability characteristics and their statistical analysis: Monograph. 2nd ed., corrected and added. Moscow: LIBROKOM; 2012. 582 p. (Series: Physico-Mathematical Heritage: Mathematics (Probability Theory)). (In Russ.).

4. Venttsel E. S., Ovcharov L. A. Applied problems of probability theory. Moscow: Radio i Svyaz; 1983. 416 p. (In Russ.).

5. Pugachev V. S., Sinitsyn I. N. Structural theory of complex stochastic systems. *Informatics and Its Applications*. 2011;2(5):4–16. (In Russ.).

6. Gmurman V. E. Probability theory and mathematical statistics. Moscow: Yurait; 2003. 427 p. (In Russ.).

7. SNiP 2.02.01–83*. Foundations of buildings and structures. Moscow: TsPP; 2006. 48 p. (In Russ.).

8. SP 22.13330.2016. Foundations of buildings and structures. Updated version of SNiP 2.02.01–83*. Moscow: Standartinform; 2016. 228 p. (In Russ.).

9. Ermolaev N. N., Mikheev V. V. Reliability of structure foundations. Leningrad: Stroyizdat, Leningrad Branch; 1976. 152 p. (In Russ.).

10. Karaulov A. M., Korolev K. V., Fedosin K. A. Determining the reliability level of the soil foundation settlement condition. *Hydropower. Hydraulic Engineering. New Developments and Technologies: Abstracts of the Sixteenth Scientific and Technical Conference*. St. Petersburg: All-Russian Vedenev Hydraulic Engineering Research Institute; 2024. P. 148–150. (In Russ.).

Информация об авторах

А. М. Караулов – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Геотехника, тоннели и метрополитены» Сибирского государственного университета путей сообщения.

К. В. Королев – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Геотехника, тоннели и метрополитены» Сибирского государственного университета путей сообщения.

К. А. Федосин – ООО «Эм-Си Баухеми», менеджер проекта MC-Bauchemie.

В. С. Королева – аспирант, инженер-проектировщик НИЛ «Геотехника, тоннели и метрополитены» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

A. M. Karaulov – Doctor of Engineering, Professor, Professor of the Geotechnics, Tunnels and Subways Department, Siberian Transport University.

K. V. Korolev – Doctor of Engineering, Associate Professor, Head of the Geotechnics, Tunnels and Subways Department, Siberian Transport University.

K. A. Fedosin – MC-Bauchemie LLC, MC-Bauchemie Project Manager.

V. S. Koroleva – Postgraduate, Design Engineer at the Geotechnics, Tunnels and Subways Research Laboratory, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 17.11.2025; одобрена после рецензирования 16.01.2026; принята к публикации 11.02.2026.

The article was submitted 17.11.2025; approved after reviewing 16.01.2026; accepted for publication 11.02.2026.

Научная статья
УДК 624.159.2
doi:10.52170/1815-9265_2026_78_109

К выбору параметров податчика для эффективной работы ударной машины при нагельном креплении грунтовых откосов

Денис Сергеевич Воронцов¹, Павел Юрьевич Сырямин², Юрий Николаевич Сырямин³✉

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

¹ voroncovds@stu.ru

² usokstu@ya.ru

³ syryaminun@stu.ru✉

Аннотация. В статье рассмотрены особенности работы клинового зажимного механизма для передачи энергии удара стержневым технологическим элементам (нагелям, инъекторам, электродам заземления и пр.) с целью выбора оптимальной силы поджатия ударной машины к грунтовому забою от податчика.

Приведена математическая модель силового взаимодействия элементов зажимного узла с целью определения наиболее значимых для передачи энергии удара факторов. Анализ показал, что наибольшее влияние при принятом угле клина имеют коэффициент его сцепления с поверхностью стержневого элемента и коэффициент трения в контакте с наковальней.

Проведены натурные эксперименты с использованием сервогидравлического пресса INSTRON 8802, в ходе которых варьировалось состояние поверхности стержня, степень затупления рабочих кромок клиньев, поджимающая сила для определения начала проскальзывания кулачков по стержню. Каждый эксперимент проводился на новом участке стержня при фиксированном давлении p в пневмоцилиндре зажима и включал не менее пяти последовательных циклов «нагрузка – разгрузка» без переустановки зажима по стержню.

Приведены графики результатов экспериментов и их анализ. Даны рекомендации для проектирования клиновых зажимных механизмов, передающих осевую нагрузку. Для управления зажимом целесообразно использовать упорно-подающее устройство – податчик. Он должен располагаться за пределами рассматриваемой системы и быть не связанным с ней. Податчик позволяет получить оптимальные поджимающие машину усилия без жестких ограничений по габаритам, массе, конструкции. Усилие от податчика также приводит к выборке всех зазоров в системе «ПУМ – зажим – грунтовый забой», что повышает эффективность передачи энергии и производительность процесса.

Ключевые слова: нагельное крепление, ударная система, клиновой зажим, силовое взаимодействие, гидравлический пресс, эксперимент, проскальзывание клина

Для цитирования: Воронцов Д. С., Сырямин П. Ю., Сырямин Ю. Н. К выбору параметров податчика для эффективной работы ударной машины при нагельном креплении грунтовых откосов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 1 (78). С. 109–118. DOI 10.52170/1815-9265_2026_78_109.

Original article

To the selection of feeder parameters for efficient operation of the impact machine when doweling soil slopes

Denis S. Vorontsov¹, Pavel Yu. Syryamin², Yury N. Syryamin³✉

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

¹ voroncovds@stu.ru

² usokstu@ya.ru

³ syryaminun@stu.ru✉

Abstract. The features of the wedge clamping mechanism for transferring impact energy to core technological elements (nuggets, injectors, grounding electrodes, etc.) are considered in order to select the optimal compression force of the impact machine to the ground face from the feeder.

A mathematical model of the force interaction of the elements of the clamping unit is presented in order to determine the most significant factors for the transmission of impact energy. The analysis showed that the coefficient of adhesion of the wedge to the surface of the core element and the coefficient of friction in contact with the anvil have the greatest effect on the accepted angle of the wedge.

Field experiments were carried out using an INSTRON 8802 servo-hydraulic press, during which the condition of the rod surface, the degree of blunting of the working edges of the wedges, and the clamping force were varied to determine the onset of cam slippage along the rod. Each experiment was carried out on a new section of the rod at a fixed pressure p in the pneumatic cylinder of the clamp and included at least five consecutive load-unloading cycles without resetting the clamp along the rod.

Graphs of experimental results and their analysis are presented. Recommendations are given for the design of wedge clamping mechanisms transmitting axial load. To control the clamp, it is advisable to use a thrust-feeding device – a feeder. It should be located outside of the system in question and be unrelated to it. The feeder allows you to obtain optimal forces that preload the machine without strict restrictions on dimensions, weight, and design. The force from the feeder also leads to the sampling of all gaps in the 'PUM – clamp – ground face' system, which increases the efficiency of energy transfer and the productivity of the process.

Keywords: doweling, impact system, wedge clamp, force interaction, hydraulic press, experiment, wedge slip

For citation: Vorontsov D. S., Syryamin P. Yu., Syryamin Yu. N. To the selection of feeder parameters for efficient operation of the impact machine when doweling soil slopes. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(78):109–118. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_78_109.

Введение

Пневмоударные машины со сквозным осевым каналом (ПУМ) для неторцевого ударного воздействия на стержневые технологические элементы (нагели, инжекторы, электроды заземления и пр.), созданные в ИГД СО РАН, не имеют аналогов в мире. Они запатентованы в РФ, США, ФРГ и других странах. Об их востребованности говорят поставки на экспорт и продажа лицензии в ФРГ. Отраслевые методики также рекомендуют их использование в технологических процессах (СТП 013–2001 «Нагельное крепление котлованов и откосов в транспортном строительстве» корпорации «Трансстрой»).

Необходимость в использовании податчика при ударном погружении стержневых элементов обоснована и показана в работе [1]. Это связано в основном с устранением зазоров в ударной системе «машина со сквозным осевым каналом – клиновой зажим – грунтовый забой». Причины их возникновения рассмотрены в работах [1, 2]. Наличие зазоров приводит к снижению производительности погружения стержневых элементов, так как потери энергии удара в первой волне на забое составляют до 30 %. Усилие от податчика также увеличивает время работы клиновых кулачков зажима до замены их на новые или восстановленные наплавкой.

Теоретические исследования

Задача исследования – определить максимальное значение поджимающей силы q от податчика, при котором начинается проскальзывание кулачков, и факторы, влияющие на этот процесс.

К основным параметрам податчика относятся: максимальная и минимальная поджимающая сила, ход и скорость штока пневмоцилиндра.

Максимальная сила поджатия на корпус машины определится из условия отсутствия проскальзывания заклинивающих элементов зажима по поверхности погружаемого элемента. Анализ силового взаимодействия элементов зажима при передаче энергии стержневому элементу без податчика приведен в работе [1]. Процесс нагружения рассматривается как квазистатический. Индексы «к» и «н» указывают, к какому из элементов системы «клин – наковальня» приложена сила, величина которой обозначена той или иной буквой (N , L и т. д.).

Схема силового взаимодействия при работе с податчиком приведена на рис. 1. В этом случае на систему будут действовать внешние осевые силы: сила сцепления F в паре «клин – стержень» и поджимающая сила q от пневмоцилиндра податчика. Сила сцепления F в реальных условиях возникает при наличии достаточного сопротивления грунта внедрению стержня.

При статическом (безударном) нагружении допустимо принять, что наковальня связана с корпусом пневмоударной машины жестко. При этом поджимающая сила q действует постоянно на корпус-наковальню.

Влияние силы удара не учитывается в данном случае, так как импульс силы кратковременен и исчисляется миллисекундами, а значение силы удара более чем на порядок превышает значение поджимающей силы q . Следовательно, процесс передачи энергии удара до определенного значения затупления рабочих кромок кулачков проходит с упругими или пластическими деформациями поверхности стержня. Это показали производственные и лабораторные испытания опытного образца.

Связь между F и силой прижатия кулачка к стержню R_k представлена простейшей зависимостью

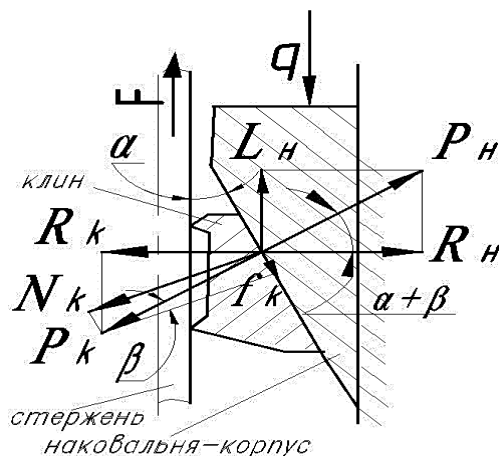


Рис. 1. Схема силового взаимодействия элементов зажима:

силы внешние: F — сила сцепления в паре «клин — стержень»; q — поджимающая сила;
силы внутренние: R_k — сила прижатия кулачка к стержню; N_k — нормальная реакция; f_k — сила трения;
 P_k — результирующая сил N_k и f_k ; L_n и R_n — реактивные силы, действующие на наковальню;
 α — угол клина

$$F = k^* R_k, \quad (1)$$

где k^* — коэффициент трения (сцепления).

В контакте «клин — наковальня» действует нормальная реакция N_k и сила трения f_k . Сила P_k — их результирующая.

Угол β определяется коэффициентом трения k в паре «наковальня — клин»:

$$\beta = \arctg k, \quad (2)$$

где $k = f_k / N_k$.

Из векторной диаграммы сил, действующих на наковальню, имеем

$$L_n = q, R_n = L_n \operatorname{ctg} (\alpha + \beta).$$

Отсюда в режиме нагружения силой q выражение для силы сцепления приобретает вид

$$F = k^* q \operatorname{ctg} (\alpha + \beta). \quad (3)$$

Для работы без проскальзывания требуется, чтобы создаваемая захватом сила сцепления F была не меньше силы поджима q :

$$F \geq q. \quad (4)$$

Учитывая (3), получаем условие, которому должна удовлетворять величина поджимающей силы, чтобы исключить проскальзывание системы «наковальня — клин» вниз по стержню:

$$\bar{g} = \frac{\operatorname{tg}(\alpha + \beta)}{k^*} - 1 \text{ при } \bar{g} = \frac{g}{F}. \quad (5)$$

Это условие справедливо и для режима забивания стержня, если сила сцепления кулачков со стержнем будет больше сопротивления грунта.

Из (3) видно, что для увеличения нагрузочной способности захвата существуют следующие пути: создание возможно большой за-

мыкающей силы q (от податчика), снижение k и α , а также увеличение k^* . Возможности первого направления сдерживаются конструктивными ограничениями на габариты ударной машины в комплексе с податчиком.

Сила q стремится сдвинуть кулачки, что приводит к возникновению силы трения f_k , препятствующей смещению машины вниз под действием импульса реактивной силы и силы удара. Существенно уменьшить коэффициент трения k в паре «наковальня — клин» практически нереально из-за высокой удельной нагрузки на контактные поверхности пары и сложности обеспечения их защиты от загрязнения. Влияние угла наклона клиновой поверхности α исследовано в работах [3, 4]. Угол β , т. е. коэффициент трения k в паре «наковальня — клин», влияет в той же мере, что и угол клина α . Роль угла β является даже определяющей, так как угол α выбирается из условия отсутствия самоторможения клина по наковальне, т. е. α определяется в зависимости от k : $\operatorname{tg} \alpha > k$.

Необходимо использовать реальные возможности для снижения трения в паре «наковальня — клин»: обеспечить высокую твердость и чистоту обработки контактной поверхности наковальни, хорошую смазку и т. д. Достижительно низкого значения k трудно, так как защита рабочих поверхностей пары «наковальня — клин» от загрязнения при данной конструкции зажима не предусмотрена. Реальные значения находятся в пределах $k = 0,1 \dots 0,15$ [5, 6].

Наименее очевидны возможности и ограничения, связанные с коэффициентом сцепления k^* . Согласно (3), если $k^* \rightarrow \infty$, то $F \rightarrow \infty$. Практически это означает, что реальная нагрузочная способность зажима без проскальзывания будет в этом случае ограничена только прочностью элементов. Пороговые значения k^* , соответствующие реальной области возможного изменения k^* и α , представлены графиками на рис. 2.

Для пары «клин – стержень» необходимо предельно высокое значение коэффициента трения (сцепления) k^* . Известна информация об условиях зажима круглой заготовки кулачками станочного патрона, что близко к зажиму стержня в рассматриваемой конструкции [7]. Коэффициент трения в этой паре существенно

зависит от формы рабочей поверхности кулачков: при гладкой поверхности k^* составляет 0,16–0,18; для поверхности с кольцевыми канавками 0,3–0,4; для канавок в виде решетки 0,4–0,5; для поверхности с острыми зубцами 0,7–1,0.

Экспериментальные исследования

Для определения оптимальной поджимающей силы $F_{\max}^{\text{под}}$ (от податчика) проведена серия лабораторных экспериментов с использованием сервогидравлического прессы INSTRON 8802 (INSTRON, Великобритания), показанного на рис. 3. Пресс позволяет получить максимальную нагрузку до 250 кН и имеет возможность одноосного растяжения, сжатия, ступенчатого нагружения. Погрешности измерения нагрузки составляют $\pm 0,25\%$,

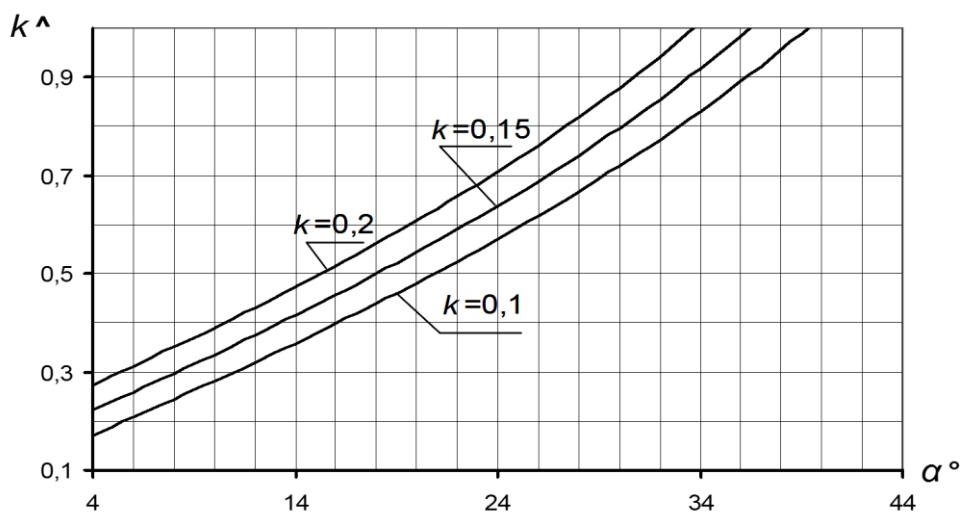


Рис. 2. Зависимость порогового значения коэффициента трения (сцепления) k^* в паре «клин – стержень» от k^* и α



Рис. 3. Сервогидравлический пресс INSTRON 8802

а деформации $\pm 0,5\%$ от измеряемой величины. Применение компьютера с программным обеспечением Console позволяет отслеживать процесс испытания образцов в масштабе реального времени, обрабатывать данные, создавать и хранить отчеты по испытаниям.

Программа нагружения задавалась по перемещению траверсы пресса со скоростью 0,5 мм/мин. В процессе экспериментов проводилось непрерывное измерение и запись в компьютерный файл осевой нагрузки. Увеличение нагружающей силы с определенной скоростью проводилось до момента начала проскальзывания заклинивающих кулачков по стержневому элементу.

В процессе работы острые зубья рабочих кромок кулачков от износа постепенно становятся тупыми, скругленными. Возникает проскальзывание, которое ведет к нарастающему снижению передаваемой энергии, усиленному износу рабочих кромок кулачков, показанному на рис. 4, и падению производительности в реальных производственных условиях [8]. Поэтому важно оценить предельную статическую нагрузку, передаваемую клиновым сопряжением зажима без проскальзывания.

В эксперименте использовался управляемый зажим 1-го типа (рис. 5). Зажимной механизм состоит из наковальни с пазами 1, в которых расположены заклинивающие кулачки 2.

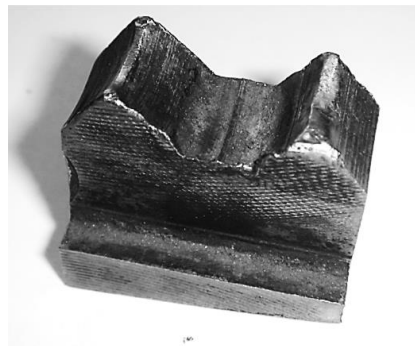


Рис. 4. Кулачок клинового зажима, изношенный от проскальзывания по стержню

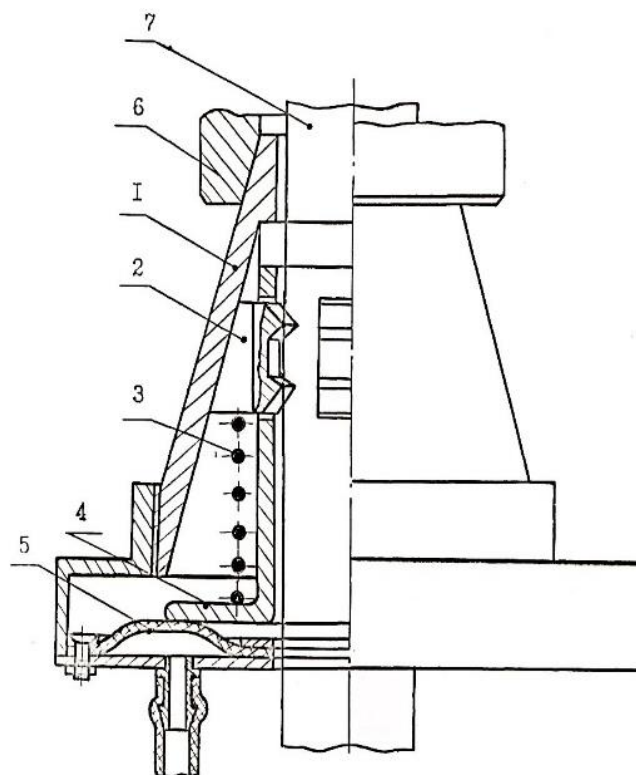


Рис. 5. Зажимной механизм 1-го типа с пневматическим приводом замыкания клиньев:
1 – корпус; 2 – кулачки; 3 – пружина; 4 – втулка; 5 – мембрана; 6 – ударный механизм; 7 – стержень

Заклинивающие элементы зафиксированы в окнах втулки 4, которая поджимается к кулачкам при подаче сжатого воздуха под мембрану 5. Вместо мембраны использовался поршень.

В эксперименте была принята схема нагружения зажима по математической модели, рассмотренной в работе [1]. Нагружающей силой Q (силой удара) в эксперименте являлась статическая сила F , создаваемая прессом (рис. 6).

Величина замыкающей силы q задавалась давлением p сжатого воздуха, подаваемого в пневмоцилиндр захвата. Сила q в этом случае является внутренней силой. Рабочая площадь поршня $2,19 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$. Тарировка пневмоцилиндра выполнена с использованием образцового динамометра ДОСМ-3-50У.

Установлено, что в режиме нарастания давления p в пределах рабочего диапазона $6 \cdot 10^5 \geq p \geq 2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ для компенсации трения в подвижных сопряжениях механизма используется 15 % рабочей площади поршня. Соответственно, замыкающая сила в эксперименте подсчитывалась как $q = 1,85 \cdot 10^{-2} p$, Н.

В испытаниях использовались стержни (трубы) диаметром 42 мм и твердостью HRC 20 двух видов, которые различались шероховатостью боковой поверхности: одни – без механической обработки (черный прокат), другие – проточены до шероховатости $R_{z6,3}$ («гладкие»).

Секторные клинья с углом заострения $\alpha = 12,5^\circ$ и треугольным профилем имели разную степень притупления: вариант Т – с пло-

щадкой притупления 1,0–1,2 мм; вариант R – с радиусом 0,3 мм и вариант О – острые. Каждый эксперимент проводился на новом участке стержня при фиксированном давлении p в пневмоциindre зажима и включал не менее пяти последовательных циклов «нагрузка – разгрузка» без переустановки зажима по стержню.

Системе автоматического управления работой пресса задавались следующие параметры цикла: для стадии нагружения – ход плунжера 2 или 3 мм; время хода 0,25 или 3 с; для разгрузки – время разгрузки 2 с до силы 400 Н.

Характерные диаграммы в координатах «перемещение плунжера пресса – сила F », полученные в экспериментах (вариант R), представлены на рис. 7. При этом использована проточенная труба ($R_{z6,3}$) диаметром 42 мм и затупленные до $R_{0,3}$ кромки кулачков зажима. Единицы измерения: сила – в кгс, перемещение плунжера пресса – в мм. Замыкающая сила q варьировалась изменением давления сжатого воздуха, подводимого к зажиму.

На рис. 8 приведены диаграммы нагружения зажима с проточенной трубой ($R_{z6,3}$), кулачки зажима с острыми кромками; на рис. 9 – диаграммы нагружения зажима, кулачки с острыми кромками, стальная труба не обработана. Варьируется поджимающая сила q . На диаграммах (см. рис. 7–9) по оси ординат отложена сила F , кгс; по оси абсцисс – перемещение Δ , мм.

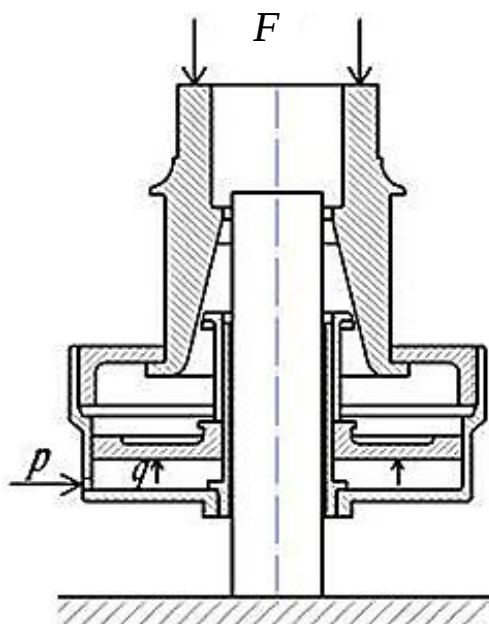


Рис. 6. Схема испытания зажима 1-го типа

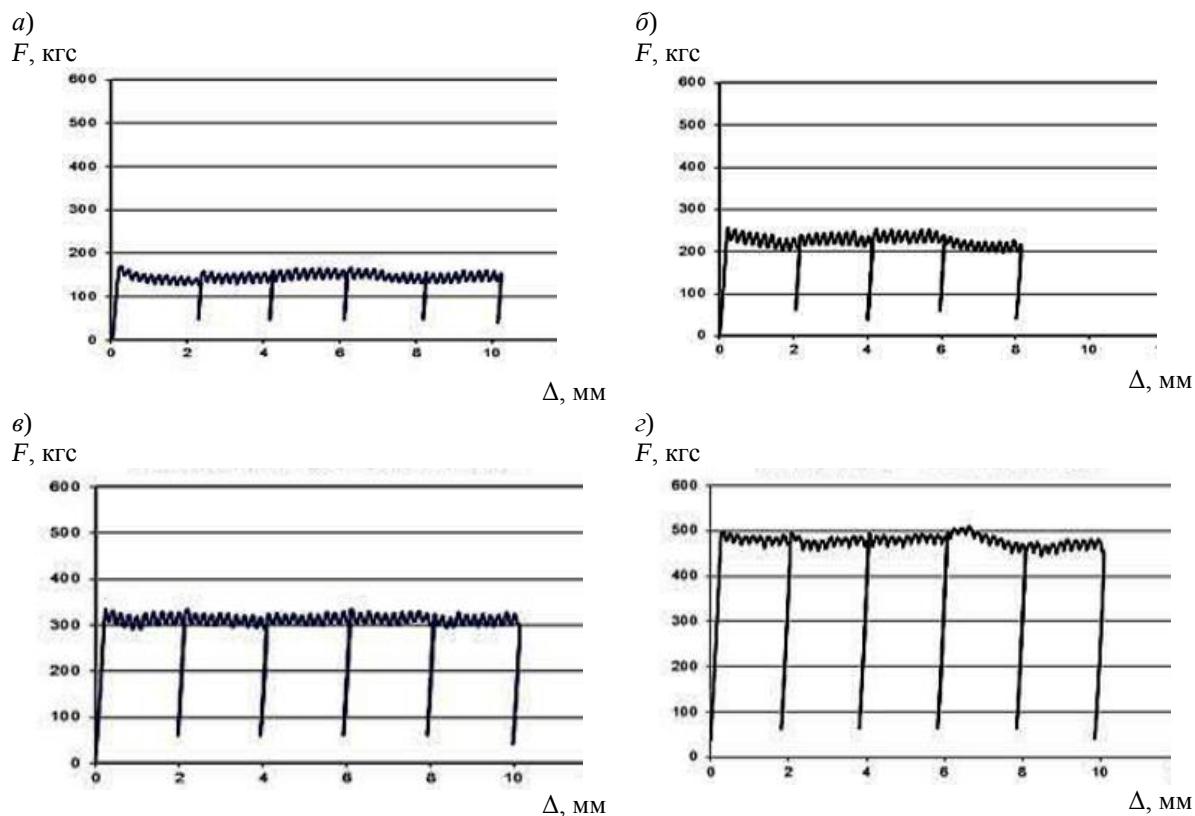


Рис. 7. Диаграммы нагружения (затупленные до R0,3 мм рабочие кромки, труба проточена):
а – $g = 353 \text{ Н}$; б – $g = 530 \text{ Н}$; в – $g = 706 \text{ Н}$; г – $g = 1\,080 \text{ Н}$

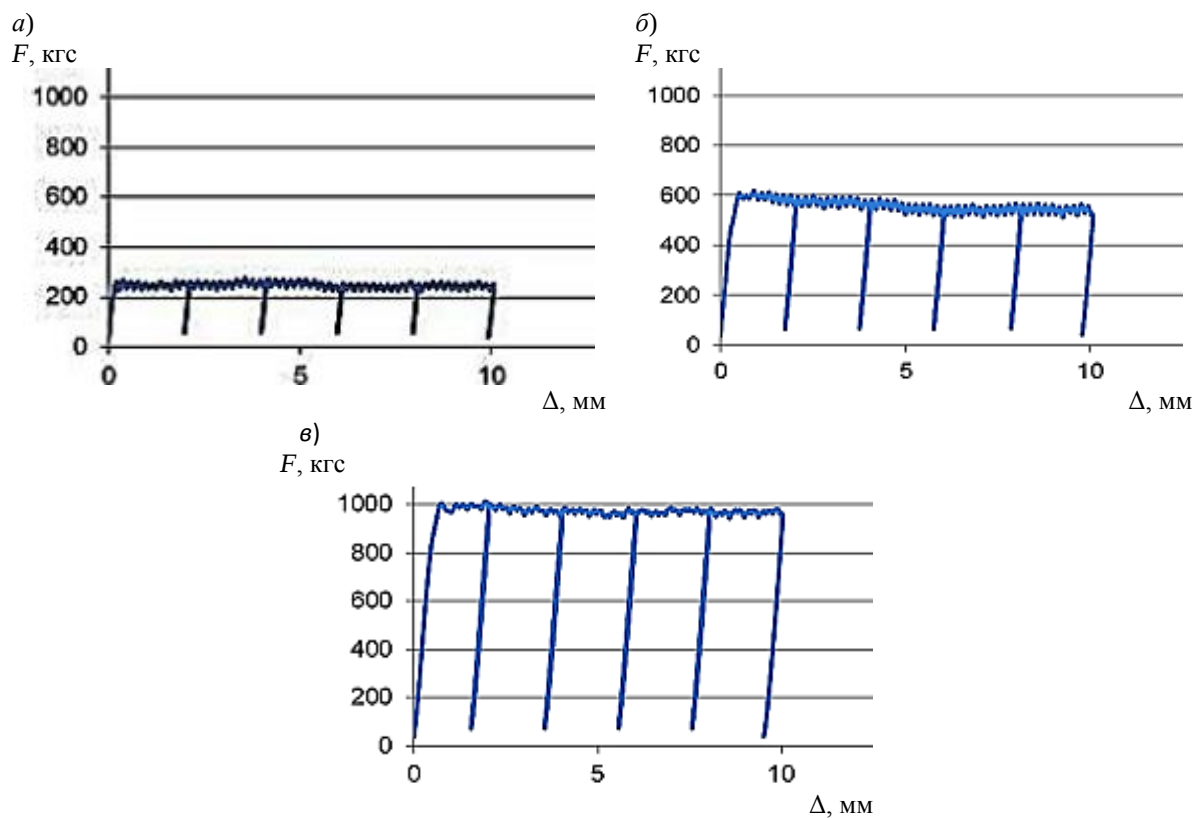


Рис. 8. Диаграммы нагружения (острые рабочие кромки, труба проточена):
а – $g = 353 \text{ Н}$; б – $g = 706 \text{ Н}$; в – $g = 1\,080 \text{ Н}$

Возможность создания большой подпорной силы g при использовании зажима 1-го типа (см. рис. 5) может быть ограничена предельной массой и габаритами переносной машины. При работе от податчика таких жестких ограничений нет, поэтому следует ориентироваться на оптимальный уровень, который зависит от условий крепления рамы податчика: либо это навеска, как сменное рабочее оборудование на строительно-дорожную машину; либо рама заякоривается вблизи забоя. В любом случае рационально ограничиться максимальным значением подпорной силы не более 10–12 кН.

При работе с зажимом 2-го типа (рис. 10) и податчиком необходимо учесть, что перед ударом величина поджимающей кулачки к стержню силы от податчика g (см. рис. 1) будет меньше на величину реактивной силы отдачи ударной машины, так как ее направление в период рабочего хода ударника способствует размыканию зажима. Естественно, что минимальная сила поджатия $F_{\min}^{\text{под}}$ от податчика должна быть не менее максимальной реактивной силы отдачи $F_{\max}$:

$$F_{\min}^{\text{под}} \geq F_{\max}. \quad (6)$$

Максимальная реактивная сила отдачи $F_{\max}$ определится как

$$F_{\max} = p_{\max} A, \quad (7)$$

где $p_{\max}$ – максимальное давление в системе привода ударника, кгс/см²; A – рабочая площадь ударника, см².

Например, для ударной машины со сквозным осевым каналом [9, 10] типа ПУМ-65: $p_{\max} = 6$ кгс/см², $A = 42$ см². Тогда $F_{\max} = 252$ кгс = 2,47 кН.

Очевидно, что остроугольные рабочие кромки клиньев обеспечивают самое высокое значение коэффициента сцепления. Тяжелые условия работы клина со временем превращают острый зуб в тупой. Поэтому важно определить момент замены клиньев на запасные, новые или восстановленные наваркой рабочих кромок твердосплавными электродами с последующей заточкой.

При заправке стержня в машину оператору необходимо преодолеть силу пружины, постоянно поджимающую кулачки. Сила сопротивления пружины не должна превышать 200 Н, что регламентировано санитарными нормами на одного рабочего. Силы трения, ввиду их малого влияния, не учитываются.

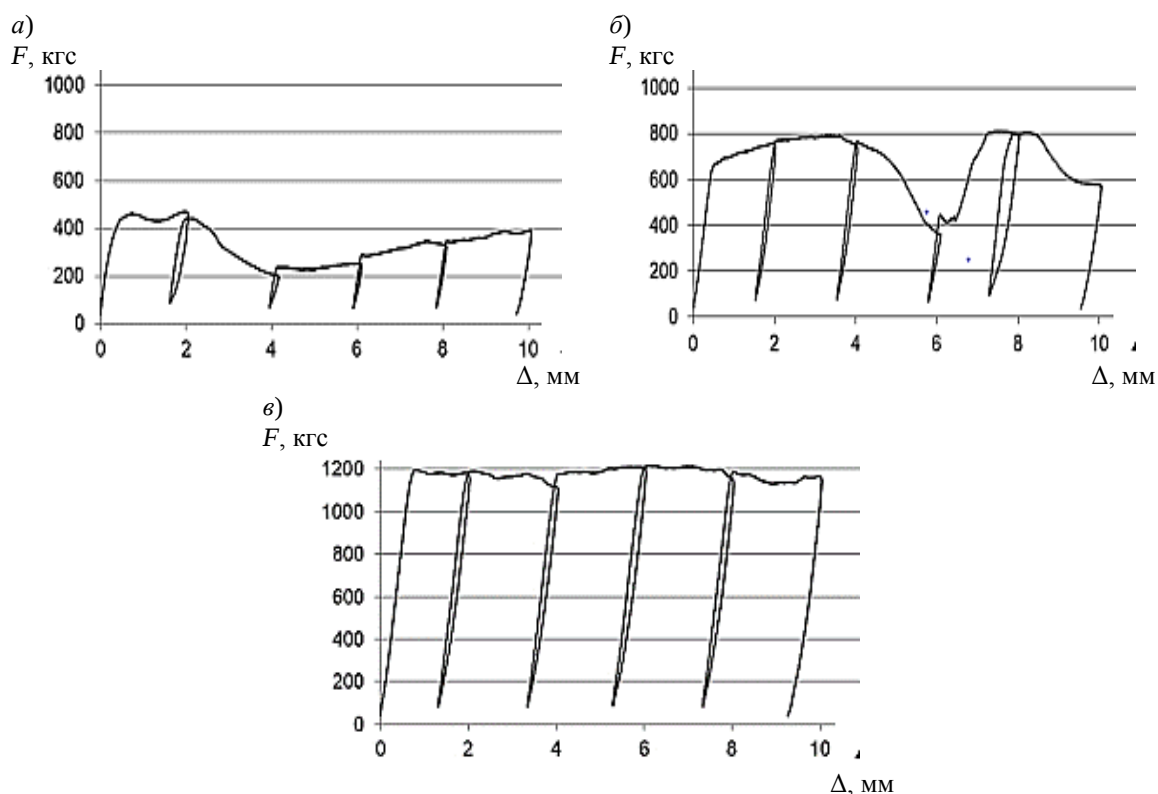


Рис. 9. Диаграммы нагружения (острые рабочие кромки, труба не обработана):

$a - g = 353$ Н; $b - g = 706$ Н; $v - g = 1\,080$ Н

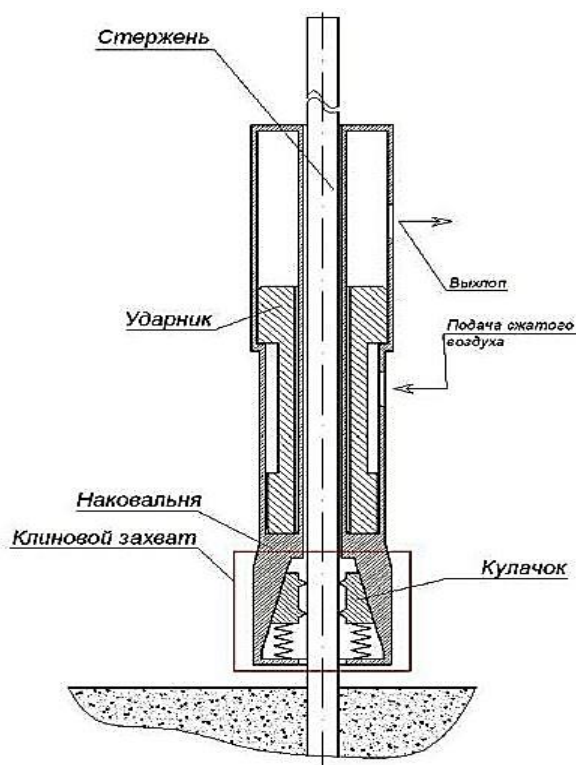


Рис. 10. Схема ударной машины типа ПУМ с зажимом 2-го типа

Выводы

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Чем больше принудительное поджатие клина, т. е. чем больше поджимающая сила g , тем надежнее сцепление с забиваемым стержнем и тем больше передаваемая стержню сила. При этом увеличивается эффективность передачи стержню энергии удара и производительность процесса.

2. В экспериментах с необработанной трубой все показания передаваемой стержню силы увеличились на 12–15 %, что объясняется наличием естественных шероховатостей на необработанной поверхности, а значит, увеличением коэффициента сцепления k^* . Такой же вывод можно сделать для стержня в виде строительной арматуры, имеющей после изготовления специальные рельефные выступы для лучшего сцепления.

3. Для повышения эффективности передачи энергии удара через клиновидный зажим при известных ограничениях на угол подъема клина α [8] необходимо по возможности уменьшать силу трения в паре «наковальня – клин» (смазка, упрочнение поверхностей контакта и снижение их шероховатости) и увеличивать ее в паре «клин – стержень» (острозубые рабочие кромки, шероховатость стержня и др.).

4. Для управления зажимом наиболее целесообразно использовать упорно-подающее устройство – податчик. Он должен располагаться за пределами рассматриваемой системы и быть не связанным с ней. Податчик позволяет получить оптимальные поджимающие машину усилия без жестких ограничений по габаритам, массе, конструкции. Усилие от податчика также приводит к выборке всех зазоров в системе «ПУМ – зажим – грунтовый забой», что повышает эффективность передачи энергии и производительность процесса.

Список источников

1. Обоснование параметров зажимного механизма, влияющих на работу ударной системы для забивания стержней в грунт / Б. Н. Смоляницкий, Ю. Н. Сырямин, П. Ю. Сырямин, Д. С. Воронцов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2016. № 4 (39). С. 33–39.
2. Анферов В. Н., Сырямин П. Ю., Сырямин Ю. Н. Резервы увеличения производительности кольцевой пневмоударной машины при сооружении нагельных креплений грунтовых откосов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 1 (73). С. 49–56.

3. Экспериментальное исследование ударной системы с неторцевым соударением / А. А. Кирилов, А. В. Прасолов, Б. Н. Смоляницкий, Л. И. Сухарева // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1988. № 2. С. 67–72.
4. Сырямин Ю. Н., Смоляницкий Б. Н., Богинский В. П. К выбору геометрии клинового зажимного механизма // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1982. № 3. С. 99–101.
5. Эберт Г. Краткий справочник по физике. Москва : Физматгиз, 1963. 552 с.
6. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя : в 3 т. Издание 9-е, переработанное и дополненное. Москва : Машиностроение, 2006. Т. 1. 981 с.
7. Крагельский И. В., Виноградова И. Э. Коэффициенты трения : справочное пособие. 2-е издание, дополненное и переработанное. Москва : Машгиз, 1962. 220 с.
8. Кириллов А. А., Смоляницкий Б. Н., Сухарева Л. И. Моделирование процесса передачи энергии удара через боковую поверхность стержневого элемента // Горные и строительные вибрационные машины и процессы : сборник научных трудов ИГД СО РАН. Новосибирск, 1988. С. 18–24.
9. Богинский В. П., Смоляницкий Б. Н. Пневмоударные машины для погружения легких стержневых элементов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1981. № 2. С. 67–72.
10. Костылев А. Д., Гурков К. С., Смоляницкий Б. Н. Пневмопробойники и машины для забивания в грунт легких строительных элементов. Новосибирск : Наука, Сибирское отделение, 1980. 48 с.

References

1. Smolyanitsky B. N., Syryamin Yu. N., Syryamin P. Yu., Vorontsov D. S. Justification of the parameters of the clamping mechanism affecting the operation of the impact system for driving rods into the ground. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2016;(39):33–39. (In Russ.).
2. Anferov V. N., Syryamin P. Yu., Syryamin Yu. N. Reserves for increasing the productivity of an annular pneumatic impact machine during the construction of dowel fastenings of soil slopes. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(73):49–56. (In Russ.).
3. Kirilov A. A., Prasolov A. V., Smolyanitsky B. N., Sukhareva L. I. Experimental study of a shock system with a non-thrust impact. *Physical and Technical Problems of Mineral Development*. 1988;(2):67–72. (In Russ.).
4. Syryamin Yu. N., Smolyanitsky B. N., Boginsky V. P. On the choice of geometry of the wedge clamping mechanism. *Physical and Technical Problems of Mineral Development*. 1982;(3):99–101. (In Russ.).
5. Ebert G. A short guide to physics. Moscow: Fizmatgiz; 1963. 552 p. (In Russ.).
6. Anuryev V. I. The designer's handbook. *Mechanical engineering*. 9th ed. 2006. Vol. 1. 981 p. (In Russ.).
7. Kragelsky I. V., Vinogradova I. E. Coefficients of friction. Textbook. Moscow; 1962. 112 p. (In Russ.).
8. Kirillov A. A., Smolyanitskiy B. N., Sukhareva L. I. Modeling of the impact energy transfer through the lateral surface of the rod element. *Proceedings of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Mining and Construction Vibration Machines and Processes*. Novosibirsk; 1988. P. 18–24. (In Russ.).
9. Boginsky V. P., Smolyanitsky B. N. Pneumatic impact machines for immersion of light rod elements. *Physical and Technical Problems of Mineral Development*. 1981;(2):67–72. (In Russ.).
10. Kostylev A. D., Gurkov K. S., Smolyanitskiy B. N. Pneumatic punches and machines for driving light construction elements into the ground. Novosibirsk: Science, Siberian Branch; 1980. 48 p. (In Russ.).

Информация об авторах

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

П. Ю. Сырямин – старший преподаватель кафедры «Подъемно-транспортные, путевые, строительные и дорожные машины» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Ю. Н. Сырямин – кандидат технических наук, доцент кафедры «Подъемно-транспортные, путевые, строительные и дорожные машины» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

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

P. Yu. Syryamin – Senior Lecturer of the Lifting and Transport, Track, Construction and Road Machinery Department, Siberian Transport University.

Yu. N. Syryamin – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Lifting and Transport, Track, Construction and Road Machinery Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 08.10.2025; одобрена после рецензирования 17.10.2025; принята к публикации 26.02.2026.
The article was submitted 08.10.2025; approved after reviewing 17.10.2025; accepted for publication 26.02.2026.

Информация для авторов

1. Предоставляемый материал должен быть оригинальным, не опубликованным ранее в других печатных изданиях.

2. Статья предоставляется в электронном виде в форматах doc, docx или rtf и одновременно в бумажном виде, отпечатанном в формате А4 с полуторным интервалом (гарнитура Times New Roman, кегль 14 pt; поля: верхнее и нижнее – 20, левое – 30, правое – 10 мм). Файл с текстом статьи должен быть назван фамилией автора (например: Иванов.doc).

3. Статья должна содержать:

- тип статьи (например, научная, обзорная, рецензия);
- УДК;
- название статьи;
- фамилию, имя и отчество каждого автора, место его работы/учебы, город, страну, ученую степень, звание, должность;
- аннотацию на русском и английском языках;
- ключевые слова на русском и английском языках;
- библиографический список на русском и английском языках.

4. Список источников составляется в порядке упоминания литературы в тексте и приводится в конце рукописи. Список должен содержать не менее 10 источников, из них собственных статей должно быть не более 30 %.

5. Графический материал должен быть выполнен в графических редакторах, поддерживающих векторную и растровую графику. Иллюстрации должны быть четкими, все подписи на рисунке должны хорошо читаться и иметь расшифровку. Если в тексте есть фотография, отсканированный рисунок, то они обязательно должны быть представлены также отдельным файлом в исходном графическом формате (например: jpeg, tiff).

6. Статья для опубликования в журнале и заявка отправляются по адресу: vestniksgups@sibgups.ru.

7. В редакцию предоставляются оригиналы документов: экспертное заключение о возможности опубликования статьи, статья и заявка.

8. Публикация статей в журнале бесплатная.

Более подробную информацию по вопросам опубликования статей и размещения другой информации в журнале можно найти на сайте издания.



www.stu.ru/science



vestniksgups@sibgups.ru



+7 383 328-04-36



630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук,
191, корп. 3, комн. 307



Главный редактор *А. Л. Манаков*
Заместитель главного редактора *А. Д. Абрамов*
Заместитель главного редактора *С. В. Карасев*
Ответственный секретарь *М. С. Галай*
Редактор перевода текста на английский язык *И. И. Степачкова*
Редактор *Е. Е. Рыжкова*
Корректор *А. А. Игумнов*
Макет, верстка *Ю. В. Борцовой*
Дизайн обложки *А. С. Петренко*

Учредитель
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет путей сообщения»

Адрес редакции
630049, Россия, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, корп. 3, комн. 307.
Телефон/факс: (383) 328-04-36.
E-mail: vestniksgups@sibgups.ru

Адрес издателя
630049, Россия, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191.
Телефон/факс: (383) 328-03-81.
E-mail: bvu@stu.ru

Подписано в печать 26.03.2026. Дата выхода в свет 27.03.2026
Тираж 350 экз. Формат 60×84/8
Объем 14,0 уч.-изд. л., 15,0 усл.-печ. л. Заказ № 4080

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
2026. № 1 (78), спецвыпуск. 1–120