

ISSN 1815-9265

ВЕСТНИК

Сибирского государственного
университета путей сообщения

№ 2 (79). 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

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

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

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

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

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

Редактор перевода текста на английский язык

Степачкова Ирина Игоревна – старший преподаватель

Редактор Е. Е. Рыжкова

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

Макет, верстка Ю. В. Борцовой

Дизайн обложки А. С. Петренко

Сайт журнала:

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

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

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

FOUNDER

The Siberian Transport University

Editors and Editorial Board

Editor-in-Chief

A. L. Manakov, Doctor of Engineering, Professor

Deputy Editor

A. D. Abramov, Doctor of Engineering, Professor

Deputy Editor

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

Executive Secretary

M. S. Galay, Candidate of Engineering

Editors

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

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

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

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

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

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

A. S. 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»

№ 2 (79) · 2026 · АПРЕЛЬ – ИЮНЬ · 16+

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

СОДЕРЖАНИЕ

Транспорт

<i>Бобров А. Л., Белобров Р. Д.</i> Использование аддитивных технологий для обеспечения измерительного контроля геометрических параметров деталей и узлов подвижного состава	5
<i>Оленберг А. А., Кочергин В. И., Корягин М. Е.</i> Оптимизация маршрутов топливозаправщиков методом Кларка – Райта при эксплуатации путевых машин.....	13
<i>Ланис А. Л., Вихт Н. С., Севостьянов А. А.</i> Обоснование необходимости дополнительных критериев назначения планово-предупредительной выправки пути на основе спектрального анализа вертикальных неровностей рельсовой колеи	23
<i>Величко Д. В., Севостьянов А. А.</i> Оптимальный срок службы крестовин стрелочных переводов	33
<i>Смирнов П. Н.</i> Альтернативный подход к оценке устойчивости бесстыкового пути	42
<i>Дмитренко А. В., Калидова А. Д., Гунбин А. А.</i> Особенности выбора способа освоения перевозок железнодорожным транспортом с учетом закономерностей развития эксплуатационной работы и транспортной сети	50
<i>Медведев В. И., Ануфриев Д. В., Сурков М. Д.</i> Теоретическое исследование свойств опасных грузов подкласса 2.1 – углеводородных газов для предупреждения рисков развития техногенных чрезвычайных ситуаций на железнодорожном транспорте.....	60
<i>Кудрявцев С. А., Вальцева Т. Ю., Гаврилов И. И., Шемякин В. Ю.</i> Мероприятия по развитию железнодорожных магистралей на деградирующих многолетне-мерзлых основаниях Восточного полигона ОАО «РЖД».....	70
<i>Нагаев Е. И., Разуваев Д. А.</i> Метод проектирования комбинированной термостабилизации основания земляного полотна транспортных сооружений в криолитозоне.....	78
<i>Хабаров В. И., Квашин В. Е.</i> Динамический мультиагентный подход для решения задачи циклической маршрутизации.....	87

Строительство и архитектура

<i>Никулич О. В., Воробьев В. С.</i> Учет характеристик грунтов земляного полотна автомобильных дорог при реализации дорожных проектов	95
<i>Исаков А. Л., Моисеева И. С.</i> Стабилизация земляного полотна из дренирующих грунтов при проектировании вторых путей железных дорог в условиях вечной мерзлоты	102
<i>Баранов Т. М., Хамидулина Д. В.</i> Моделирование и оценка экономической эффективности полимерных композитных материалов при ремонте проезжей части мостов	114

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"

№ 2 (79) • 2026 • April – June • 16+

Issued quarterly. Established in 1999

CONTENTS

Transport

- A. L. Bobrov, R. D. Belobrov.* Using additive technologies to ensure measurement control of geometric parameters of parts and assemblies of rolling stock.....5
- A. A. Olenberg, V. I. Kochergin, M. E. Koryagin.* Route optimization for fuel delivery to railway transport using the Clarke – Wright method13
- A. L. Lanis, N. S. Vikht, A. A. Sevostyanov.* Justification of the need for additional criteria for scheduling preventive track surfacing based on spectral analysis of vertical irregularities in the track gauge23
- D. V. Velichko, A. A. Sevostyanov.* Optimal service life of switchback crossings33
- P. N. Smirnov.* An alternative approach to assessing the stability of continuous welded rail42
- A. V. Dmitrenko, A. D. Kalidova, A. A. Gunbin.* Peculiarities of choosing a method for developing rail transportation, taking into account the development patterns of operational work and the transport network.....50
- V. I. Medvedev, D. V. Anufriev, M. D. Surkov.* A theoretical study of the subclass 2.1 hazardous goods properties – hydrocarbon gases to prevent the risks of developing man-made emergencies in rail transport60
- S. A. Kudryavtsev, T. Yu. Valtseva, I. I. Gavrilov, V. Yu. Shemyakin.* Activities for the development of railway lines on degrading permafrost bases of the Eastern polygon of Russian Railways..... 70
- E. I. Nagaev, D. A. Razuvaev.* Design method for combined thermal stabilization of the railway roadbed foundation of transport structures in the permafrost zone.....78
- V. I. Khabarov, V. E. Kvashnin.* The dynamic multi-agent approach to solving the traveling salesman problem87

Building and Architecture

- O. V. Nikulich, V. S. Vorobyov.* Consideration of highway subgrade characteristics in the implementation of road projects.....95
- A. L. Isakov, I. S. Moiseeva.* Stabilization of the subgrade formed by draining soils in the design of second tracks on railways in cold regions.....102
- T. M. Baranov, D. V. Khamidulina.* Modeling and evaluation of the economic efficiency of polymer composite materials in bridge deck repair.....114

ТРАНСПОРТ

Научная статья
УДК 658.563
doi:10.52170/1815-9265_2026_79_5

Использование аддитивных технологий для обеспечения измерительного контроля геометрических параметров деталей и узлов подвижного состава

Алексей Леондович Бобров^{1✉}, Роман Денисович Белобров²

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

¹ acndt@mail.ru✉

² belobrov41@gmail.com

Аннотация. В практике контроля технического состояния деталей и узлов подвижного состава в процессе эксплуатации и ремонта важное значение имеет своевременное определение отклонений геометрических размеров ответственных элементов тележки, автосцепного устройства и других узлов, которое осуществляется с помощью специализированных шаблонов и калибров. В статье рассмотрены возможности замены дорогостоящих металлических шаблонов шаблонами из полимерного материала, которые значительно легче и дешевле в производстве. Актуальность замены определяется достаточно большим количеством необходимых средств измерения такого типа и специалистов, которые используют эти шаблоны и калибры в процессе ремонта и обслуживания подвижного состава железных дорог, в том числе в полевых условиях.

В статье проанализированы различные шаблоны для определения параметров узлов подвижного состава и определены те из них, которые возможно заменить на более легкие и дешевые. Часть таких шаблонов, достаточно простых и не имеющих подвижных частей, целесообразно в порядке эксперимента заменить на шаблоны из полимерного материала, изготовленные методом 3D-печати. В работе приведены данные по изготовлению таких шаблонов из разных полимерных материалов. Наиболее пригодным для этого материалом стал PETG-пластик, для которого определены оптимальные параметры и условия его печати. Эксплуатация этих средств измерения в течение года показала, что они более удобны при использовании, их метрологические характеристики аналогичны характеристикам металлических шаблонов.

Ключевые слова: аддитивные технологии, измерения, пластик, подвижной состав, размеры деталей, ремонт, шаблон

Для цитирования: Бобров А. Л., Белобров Р. Д. Использование аддитивных технологий для обеспечения измерительного контроля геометрических параметров деталей и узлов подвижного состава // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 2 (79). С. 5–12. DOI 10.52170/1815-9265_2026_79_5.

TRANSPORT

Original article

Using additive technologies to ensure measurement control of geometric parameters of parts and assemblies of rolling stock

Aleksey L. Bobrov^{1✉}, Roman D. Belobrov²

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

¹ acndt@mail.ru✉

² belobrov41@gmail.com

Abstract. In the practice of monitoring the technical condition of rolling stock components and assemblies during operation and repair, timely determination of geometric deviations in critical bogie components, automatic coupling devices, and other assemblies is essential. This determination is accomplished using specialized templates and gauges. This article examines the possibility of replacing expensive metal templates with polymer templates, which are significantly less expensive to produce. The relevance of such a replacement is explained by the relatively large number of required measuring instruments of this type and the number of specialists who need to use these templates and gauges during the repair and maintenance of railway rolling stock. The need for a single worker to use a wide range of templates in the field necessitates the search for lighter, easier-to-use alternatives to heavy steel templates.

This article analyzes various templates for determining rolling stock component parameters and identifies those that can be replaced with lighter and less expensive ones. Some of these templates, which are relatively simple and lack moving parts, could be experimentally replaced with a polymer material produced using 3D printing. The paper presents data on the production of such templates from various polymeric materials, as well as the specifics of manufacturing templates from different polymeric materials. PETG-plastic proved to be the most suitable material for template production, for which the article provides optimal parameters and printing conditions. A year of use of these measuring instruments demonstrated that they are more convenient to use, and their metrological characteristics are similar to those of metal templates.

Keywords: additive technologies, measurements, plastic, rolling stock, part sizes, repair, template

For citation: Bobrov A. L., Belobrov R. D. Using additive technologies to ensure measurement control of geometric parameters of parts and assemblies of rolling stock. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(79):5–12. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_79_5.

Введение

Одним из основных процессов, обеспечивающих качество ремонта подвижного состава на вагоноремонтных и локомотиворемонтных предприятиях, является измерение геометрических параметров деталей и узлов. Важность качественного проведения этих измерений трудно переоценить: своевременное определение несоответствий сказывается на надежности работы всех механических узлов подвижного состава в межремонтный период. Однако эти измерения до сих пор проводятся специалистами самостоятельно и вручную. Поэтому возможные направления оптимизации процессов измерения геометрических размеров деталей, зазоров и иных расстояний в узлах подвижного состава актуальны и востребованы. Другой стороной этого вопроса является повышение эффективности измерений при аналогичных или меньших затратах на них [1, 2]. Для этого производится обмен опытом с другими компаниями, но также применяются идеи работников компании [3]. Существует довольно большое количество способов оптимизировать процессы ремонта и его логистики непосредственно на предприятиях, например:

- проекты бережливого производства, с помощью которых в структурных ремонтных подразделениях предлагаются изменения в процессах выполняемых работ, направленные на сокращение затрат [4];
- система поощрения рационализаторских предложений, эффективность которых приводится в работе [5];

- логистические методы встраивания технологий ремонта новых типов деталей и узлов [6];
- разработка новых средств ремонта, контроля и диагностики деталей и встраивание их в процесс ремонта [7];
- поиск оптимальных производственных решений по результатам анализа моделирования ремонтных процессов [8].

Материалы и методы исследований

Одной из ключевых проблем обеспечения качества ремонта подвижного состава является своевременное, качественное, простое и быстрое определение соответствия геометрических размеров нормативным с помощью шаблонов, калибров и иных средств измерения. В табл. 1 приведено число средств контроля соответствия геометрических размеров при разных видах ремонта и техническом обслуживании некоторых узлов подвижного состава, при этом учтены средства измерения для наиболее распространенных типов узлов и деталей. Так, например, данные по средствам измерения параметров колесных пар электропоездов учитывают только специализированные шаблоны для измерения основных параметров, применимые для всех типов электропоездов, и не включают шаблоны для отдельных типов электропоездов.

Достаточно большая номенклатура средств измерения геометрических параметров деталей и узлов подвижного состава и относительно небольшое количество предприятий по ремонту подвижного состава (менее 500 предприятий, их филиалов и обособленных подразделений) имеют следствием существенные недостатки, такие как:

Таблица 1

Средства измерения геометрических параметров деталей подвижного состава

Узел	Кол-во шаблонов, калибров и т. п.	Кол-во модификаций
Автосцепное устройство	43	19
Тележка грузового вагона	26	3
Колесная пара грузового вагона	14	–
Колесная пара электропоезда	28	3

– высокая стоимость отдельных шаблонов и калибров, характерная для единичного и мелкосерийного производства;

– высокая стоимость поддержания работоспособного состояния шаблонов и калибров, требующая единичного ремонта и регулярного метрологического обеспечения в виде поверок или калибровок;

– временные потери, связанные с несовершенством технологических цепочек ремонта отдельных деталей и узлов на линейных ремонтных предприятиях.

Дополнительным недостатком является достаточно большой процент выхода из строя рассматриваемых средств измерений. В табл. 2 приведены сведения о количестве некоторых шаблонов, наиболее часто отбраковываемых в ходе периодической ежегодной ревизии и калибровки в Западно-Сибирском центре метрологии. В конце таблицы для сравнения приведены абсолютный шаблон Т416.38.000СБ (№ 873) и шаблон Т914.19.000, доля отбраковки которых при поверке близка к средним значениям для различных типов шаблонов. Характерной особенностью подавляющего большинства шаблонов является их неремонтопригодность, т. е. такие шаблоны необходимо утилизировать и заменять новыми.

В среднем ежегодно эксплуатационные предприятия, занимающиеся текущим ремонтом вагоном в Западной Сибири, на закупку затрачивают от 2 до 3 млн р. в зависимости от износа средств измерений, находящихся на балансе, в том числе на закупку нового типа средств измерений. И найти альтернативу таким достаточно простым, но специализированным средствам измерения нелегко.

Анализ инновационных подходов к решению описанной проблемы показал, что наиболее перспективными направлениями оптимиза-

ции расходов, связанных с материальной поддержкой метрологического обеспечения ремонта подвижного состава, являются:

– удешевление производства шаблонов за счет использования более дешевых материалов и технологий изготовления, например аддитивных;

– принципиальное изменение подхода к процессу измерения, например использование оптических методов измерения с формированием профиля деталей в электронном формате и последующей корректировкой программы ремонта конкретного участка детали, обеспечивающей увеличение времени эксплуатации между ремонтами.

Использование аддитивных технологий для изготовления изделий, не испытывающих больших нагрузок, вполне возможно, что показано в некоторых работах [9, 10].

Современные автоматизированные и роботизированные технологии позволяют проводить измерения геометрических параметров поверхностей различной сложности изделий с повышенной точностью, высокой производительностью, обеспечивают внутренний контроль точности измерений (например, устройство, предложенное в патенте [11]). Более того, проводятся активные работы по внедрению таких методов в технологии контроля профиля ответственных деталей подвижного состава, таких как поверхность катания колеса [12], в том числе и расчетные работы по оценке состояния измеряемых поверхностей [13].

Очевидно, что решение проблемы повышения экономической эффективности процедур измерения многочисленных геометрических параметров деталей и узлов подвижного состава в ходе его ремонта не может быть простым в силу большого разнообразия измеряемых параметров, использования средств изме-

Таблица 2

Процентное отношение отбраковываемых при калибровке шаблонов в 2022–2024 гг. и средний срок службы шаблонов

Тип шаблона	Кол-во проверенных средств, шт.	Доля забракованных средств, %			Средний срок службы, лет
		2022 г.	2023 г.	2024 г.	
Шаблон Т447.05.000	850	10	11,1	9,2	9,9
Приспособление Т1436.000	150	13,3	12,0	10,7	8,3
Устройство Т1339.00.000СБ	50	24,0	16,0	8,0	6,3
Шаблон Т447.08.000	900	6,1	4,4	5,0	14,4
Шаблон Т416.38.000СБ (873)	450	2,7	5,1	2,2	20,0
Шаблон Т914.19.000	450	2,4	4,8	3,6	17,8

рения в различные временные отрезки, на разных пространственных позициях на предприятиях, а также по другим причинам.

Для сокращения затрат на закупку средств измерений было предложено на мощностях структурного подразделения изготавливать средства измерений из полимерных материалов с применением аддитивных технологий. Такой способ решения проблемы возможен для средств с невысокой точностью определения геометрических параметров или проходных и непроходных шаблонов. Основным достоинством такого подхода является то обстоятельство, что изготовление шаблонов из полимерных материалов может оказаться существенно дешевле создания металлических. То есть целесообразно использовать шаблоны, для которых соотношение сравнительной стоимости S_i и среднего времени эксплуатации k_i минимально. Например, при сравнении шаблонов, изготовленных разными способами или из различных материалов (1 и 2), с экономической точки зрения выбор за шаблоном, для которого выполняется условие

$$\frac{S}{k} = \min \left\{ \frac{S_1}{k_1}; \frac{S_2}{k_2} \right\}.$$

Однако при отсутствии реального опыта эксплуатации средства параметр k_i неизвестен, в этом случае только экспериментальное внедрение и эксплуатация такого шаблона позволяют оценить его эффективность.

На первом этапе работы по экспериментальному внедрению шаблонов из полимерных материалов, изготовленных методом 3D-печати, необходимо было определить, какой тип полимерных материалов следует применять.

Анализ возможности использования самого распространенного вида полимерного материала полилактида (PLA), как самого доступного пластика для 3D-принтера, показал, что при дальнейшем испытании он начинал деформироваться при высоких температурах окружающей среды, которые устанавливаются на ремонтных участках в летнее время. Кроме того, при механическом воздействии такой шаблон разрушается, а также на него отрицательно влияет ультрафиолетовое излучение. Указанные причины не допускали дальнейшего использования этого материала для изготовления шаблонов.

Экспериментальное использование акрилонитрилбутадиенстирола (ABS), второго по

частоте использования пластика для 3D-печати, показало хорошие прочностные характеристики, при дополнительных механических воздействиях материал не разрушался. Однако ABS-пластик имеет существенный недостаток – большую усадку при изготовлении, что делает невозможным создание шаблонов с необходимыми геометрическими допусками размеров и минимальной задаваемой для данных средств погрешностью измерения.

Наиболее качественные шаблоны были получены из полиэтилентерефталат-гликоля (PETG) – относительно нового материала по сравнению с приведенными выше. Этот материал лишен свойственных для PLA- и ABS-пластиков недостатков; PETG достаточно ударопрочный, а спекаемость слоев получается такой, что при ударной нагрузке готовые изделия обладают наибольшей прочностью.

Для печати на базе чертежных параметров шаблонов были созданы модели в программе «Компас-3D» (рис. 1).

Для опытной эксплуатации из PETG-пластика получены изделия при следующих параметрах печати:

- температура экструзии – 215...245 °C;
- температура стола – 20...80 °C;
- обдув – 20 %;
- межслойная адгезия – очень высокая;
- адгезия к столу – средняя;
- температура плавления – 222...225 °C;
- температура размягчения – 80 °C;
- точность печати – $\pm 0,1$ мм;
- фотополимерная печать с автоматической разбивкой по слоям;
- минимальная толщина слоя – 0,1 мм;
- усадки при изготовлении изделий нет.

Полученный материал обладает следующими свойствами:

- температура эксплуатации – от –40 до +70 °C;
- твердость (по Роквеллу) – R106;
- относительное удлинение при разрыве – 50 %;
- предел прочности на изгиб – 76,1 МПа;
- предел прочности на разрыв – 36,5 МПа;
- модуль упругости при растяжении – 2,6 ГПа;
- модуль упругости при изгибе – 1,12 ГПа;
- температура стеклования – 80 °C;
- плотность – 1,3 г/см³.

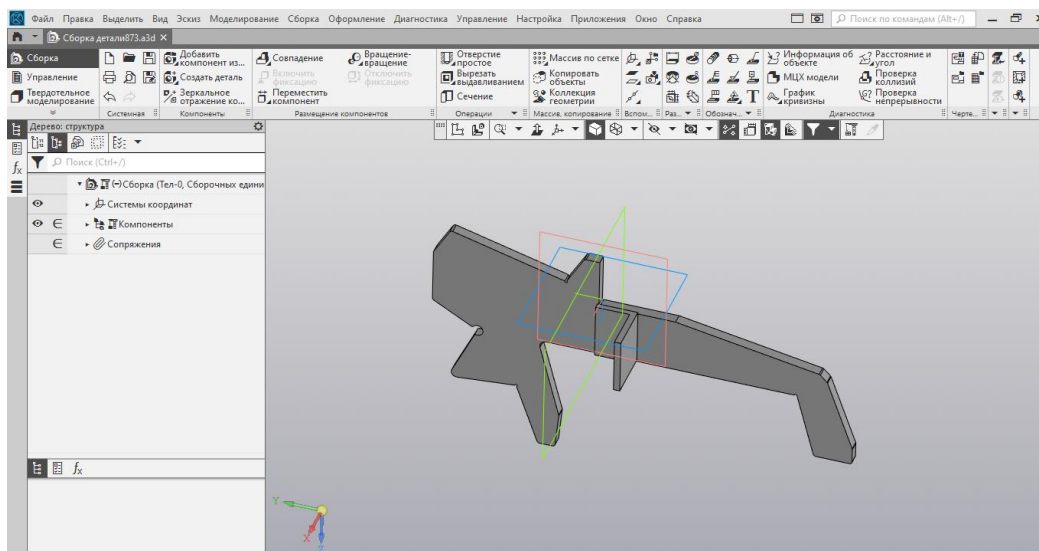


Рис. 1. 3D-модель шаблона 873

После изготовления поверхность шаблонов была зачищена наждачной бумагой P1000 для обеспечения требуемой шероховатости. Основные размеры полученного шаблона из PETG-пластика измерили с помощью штангенциркуля с ценой деления 0,05 мм. Все параметры, включая шероховатость, были в пределах допуска.

Результаты исследований

Главные достоинства материала PETG: отсутствие усадки, что обеспечивает высокую точность при изготовлении средств измерений; очень сильное спекание между слоями, а значит, высокая прочность; стойкость к ультрафиолету; широкий температурный диапазон.

Для изготовления опытных образцов были выбраны шаблоны измерения завышения фрикционного клина (модель T914.19.000) и шаблон 873 (рис. 2) для контроля размеров автосцепки (модель T416.38.000), так как они не имеют движущихся деталей, что позволило упростить их изготовление.

Затем образцы были отправлены на испытания для проверки работоспособности в условиях опытной эксплуатации и сравнения их с металлическими средствами измерений. В течение 14 дней средства измерений ежедневно эксплуатировались старшими осмотрщиками-ремонтниками вагонов, но измерения некоторых параметров производили основными средствами измерений, так как шаблон измерения завышения фрикционного клина (T914.19.000) и шаблон 873 (T416.38.000) были не откалиброваны.

При эксплуатации таких шаблонов из PETG-пластика за время опытной эксплуатации геометрические размеры не претерпели изменений, несмотря на гигроскопичность этого материала. Однако требуется дальнейшее наблюдение за изменениями гигроскопичности.

Сотрудники, эксплуатировавшие пластиковые средства измерений, отмечают следующие положительные свойства:

- такие шаблоны существенно облегчают сумку для проведения технического обслуживания подвижного состава;



Рис. 2. Шаблон 873, выполненный на 3D-принтере

– при измерениях легкие шаблоны более удобны;

– в холодное время при измерениях медленнее замерзают руки.

Эти обстоятельства улучшают условия труда работников. При параллельных измерениях металлическими шаблонами отклонений в результатах не отмечено.

На втором этапе для полного введения в эксплуатацию полимерных шаблонов были разработаны методики входного контроля, паспорта средств измерений и методика калибровки полимерных средств измерений. После испытаний был определен тип 3D-принтера, который будет печатать шаблоны с заданной точностью, затем следует их калибровка в Новосибирском центре метрологии и последующий ввод в эксплуатацию средств измерений.

В одном эксплуатационном вагонном депо количество сотрудников, использующих средства измерения, довольно большое. Например, в эксплуатационном вагонном депо Инская с шаблонами работают осмотрщики-ремонтники вагонов, осмотрщики вагонов, старшие осмотрщики-ремонтники, слесари подвижного состава, бригадиры и мастера участков, входящих в состав предприятия. Всего таких сотрудников по штату на момент изготовления шаблонов было 642 человека, поэтому, с учетом сменной работы, для обеспечения измерений необходимо минимум 162 шаблона. Дополнительно необходимо укомплектовать стенды на участках средствами измерений и поддерживать их неснижаемый запас, так как калибровка производится другим структурным подразделением, входящим в состав ОАО «РЖД».

ОАО «РЖД» в 2024 г. приобретение шаблона по измерению завышения фрикционного клина (Т914.19.000) обошлось в 5 436,99 р., а шаблона 873 (Т416.38.000) – в 8 196,56 р. Модели, распечатанные на 3D-принтере из PETG, обходятся в 1 850 р. С учетом того обстоятельства, что средний срок службы металлических шаблонов варьируется от 6 до 20 лет, оценка экономической эффективности по приведенной выше формуле позволяет заключить, что даже сокращение среднего срока службы для шаблонов измерения завышения фрикционного клина (шаблон Т914.19.000) в три раза или шаблона 873 (Т416.38.000) в четыре раза равноценно затратам на действующие металлические шаблоны. Кроме того, печать шаблонов на одном из

предприятий существенно сокращает накладные расходы и затраты времени на путь от производства до его непосредственного использования.

Выводы

Процедуры измерения геометрических размеров деталей и узлов подвижного состава на современном этапе развития техники целесообразно оптимизировать двумя путями:

– в ряде случаев снизить затраты возможно путем применения аддитивных технологий изготовления шаблонов;

– следует рассмотреть возможность организации измерений с использованием оптических систем, так как этот способ имеет широкие возможности автоматизации и обеспечивает обслуживание подвижного состава на высоком технологическом уровне.

Измерение геометрических параметров шаблонами моделей Т914.19.000 и Т416.38.000, изготовленными из PETG-пластика на 3D-принтере, в течение года показало, что они более удобны в эксплуатации из-за меньшего веса, а их метрологические характеристики аналогичны параметрам металлических шаблонов. Таким образом, предложение по изготовлению средств измерений из полимерных материалов позволяет улучшить условия труда работников и сократить траты на их изготовление и замену.

На следующем этапе для оценки экономического эффекта внедрения таких шаблонов следует определить средний срок эксплуатации таких средств измерений.

Необходимо проанализировать структуру процессов измерения геометрических параметров деталей при обслуживании и ремонте подвижного состава и определить перечень шаблонов, для которых целесообразно перейти на технологию изготовления из PETG-пластика на 3D-принтере.

Для оценки долговечности шаблонов из PETG-пластика разработана программа исследований, включающая анализ динамики изменения размеров в зависимости от воздействия влажного воздуха и общей их долговечности с учетом износа. Следует отметить, что PETG-пластик имеет существенный недостаток: он гигроскопичен, поэтому требуется пристальное внимание к возможным изменениям геометрических размеров шаблонов из этого материала в процессе дальнейшей опытной эксплуатации.

Список источников

1. Моделирование и оптимизация системы ремонта вагонов / А. В. Зяблов, С. В. Беспалько, П. С. Григорьев, Ю. А. Кузнецова // Железнодорожный транспорт. 2021. № 2. С. 64–66.
2. Аскарлов Р. Р., Кашковский В. В., Тихий И. И. Оптимизация системы технической эксплуатации грузового вагонного состава при организации интенсивных сквозных маршрутных перевозок // Молодая наука Сибири. 2020. № 4 (10). С. 186–197.
3. Глухов С. В., Кованин М. А., Шосткин С. В. Оптимизация технического обслуживания и ремонта моторвагонного подвижного состава // Железнодорожный транспорт. 2013. № 7. С. 60–61.
4. Протасова А. Д., Жебанов А. В. Применение элементов бережливого производства с целью оптимизации организации работы участка по текущему ремонту грузовых вагонов // Наука, образование, транспорт: актуальные вопросы, приоритеты, векторы взаимодействия : материалы II Международной научно-методической конференции : в 3 частях. Оренбург : Самарский государственный университет путей сообщения, 2023. С. 138–142.
5. Ярушкіна Н. А., Матюгіна Э. Г. Прогнозирование инновационной активности компании на основе индикаторов инновационного потенциала персонала // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Экономика. 2021. № 3. С. 67–76.
6. Бубнов В. М., Кебал И. Ю., Манкевич Н. Б. Совершенствование технологии ремонта специализированных грузовых вагонов // Наука та прогресс транспорту. 2016. № 1 (61). С. 62–70.
7. Самойлова Е. В., Черток Е. В. Новые системы для обслуживания, эксплуатации, изготовления и ремонта вагонов, локомотивов, а также эскалаторов метрополитенов // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2009. № 3 (20). С. 220–223.
8. Школина Д. И., Ададунов А. С., Бехер С. А. Оптимизация ресурсов распределенных производственных процессов с использованием имитационного моделирования // Мир транспорта. 2022. Т. 20, № 6 (103). С. 56–63.
9. Дешковский В. Н., Рожко А. А. Практическое применение аддитивных технологий в геомеханике // Маркшейдерский вестник. 2024. № 1. С. 54–57.
10. Базров Б. М., Хейфец М. Л. Совершенствование основ теории базирования с учетом развития традиционных и аддитивных технологий // Доклады Национальной академии наук Беларуси. 2020. Т. 64, № 5. С. 617–623.
11. Патент 2825540 Российская Федерация, МПК G 01 B 11/03. Устройство для многоточечного контроля геометрии сложного профиля : № 2024117583 : заявл. 26.06.2024 : опубл. 27.08.2024 / Кудашов Е. В., Жидяев А. Н., Рузанов Н. В.
12. Лексутов И. С., Ключа В. П. К возможности применения линейного сканера для создания средств технического контроля геометрических параметров продольного сечения поверхности катания колеса вагона // Известия Транссиба. 2022. № 3 (51). С. 51–63.
13. Разработка перспективного алгоритма расчета и оценки геометрических параметров колесной пары в комплексе КОНЛОК / А. С. Ададунов, И. Ю. Савельев, М. А. Чепулис, К. Г. Аринушкина // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2023. Т. 82, № 3. С. 247–256.

References

1. Zyablov A. V., Bsepalko S. V., Grigoriev P. S., Kuznetsova Yu. A. Modeling and optimization of the wagon repair system. *Railway Transport*. 2021;(2):64–66. (In Russ.).
2. Askarov R. R., Kashkovsky V. V., Tichiy I. I. Optimization of the system of technical operation of the freight wagon staff in organization of intensive through-route transportation. *Young Science of Siberia*. 2020;(10):186–197. (In Russ.).
3. Glukhov S. V., Kovanin M. A., Shostkin S. V. Optimization of maintenance and repair of motor-car rolling stock. *Railway Transport*. 2013;(7):60–61. (In Russ.).
4. Protasov A. D., Zhebanov A. V. The use of lean manufacturing elements in order to optimize the organization of the work of the site for the current repair of freight cars. *Science, Education, Transport: Current Issues, Priorities, Vectors of Interaction. Proceedings of II the Scientific Conference*. Orenburg; 2023. P. 138–142. (In Russ.).
5. Yarushkina N. A., Matyugina E. G. Forecasting business innovative activity using indicators of innovative potential of personnel. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Economics*. 2021; (3):67–76. (In Russ.).
6. Bubnov V. M., Kebal I. Yu., Mankevych M. B. Repair technology improvement of specialized freight cars. *Science and Transport Progress*. 2016;(61):62–70. (In Russ.).
7. Samoilova E. V., Chertok E. V. New systems for the maintenance, operation, manufacture and repair of wagons, locomotives, and subway escalators. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2009;(20):220–223. (In Russ.).

8. Shkolina D. I., Adadurov A. S., Bekher S. A. Resource optimization of distributed manufacturing processes using simulation. *World of Transport and Transportation*. 2022;20(103):56–63. (In Russ.).
9. Deshkovsky V. N., Rozhko A. A. Practical application of additive manufacturing in geomechanics. *Mine Surveying Bulletin*. 2024;(1):54–57. (In Russ.).
10. Bazrov B. M., Kheifetz M. L. Improvement bases of the theory basing with account for the development of traditional and additive technologies. *Papers of the National Academy of Sciences of Belarus*. 2020;64(5):617–623. (In Russ.).
11. Patent 2825540 RF. Int. Cl. G 01 B 11/03. Device for multi-point control of geometry of complex profile. Kudashov E. V., Zhidyayev A. N., Ruzanov N. V. No. 2024117583; filed on 26.06.2024; published on 27.08.2024. (In Russ.).
12. Leksutov I. S., Klyuka V. P. To the possibility of using a linear scanner to create means of technical control of geometric parameters of the longitudinal section of the rolling surface of the railcar wheel. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2022;3(51):51–63. (In Russ.).
13. Adadurov A. S., Savelev I. Yu, Chepulis M.A, Arinushkina K.G. Development of an advanced algorithm for calculating and assessing the wheel pair geometry in the conloc system. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(3):247–256. (In Russ.).

Информация об авторах

А. Л. Бобров – доктор технических наук, профессор кафедры «Физика, электротехника, диагностика и управление в технических системах» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Р. Д. Белобров – аспирант кафедры «Физика, электротехника, диагностика и управление в технических системах» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

A. L. Bobrov – Doctor of Engineering, Professor of the Physics, Electrical Engineering, Diagnostics, and Control in Technical Systems Department, Siberian Transport University.

R. D. Belobrov – Postgraduate of the Physics, Electrical Engineering, Diagnostics, and Control in Technical Systems Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 04.03.2026; одобрена после рецензирования 18.03.2026; принята к публикации 31.03.2026.

The article was submitted 04.03.2026; approved after reviewing 18.03.2026; accepted for publication 31.03.2026.

Научная статья
УДК 656.078.11
doi:10.52170/1815-9265_2026_79_13

Оптимизация маршрутов топливозаправщиков методом Кларка – Райта при эксплуатации путевых машин

Артур Андреевич Оленберг¹, Виктор Иванович Кочергин^{2✉}, Марк Евгеньевич Корягин³

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

¹ snipe54@yandex.ru

² vkplus2011@yandex.ru✉

³ math@stu.ru

Аннотация. В статье рассматривается задача оптимизации маршрутов доставки топливно-смазочных материалов специальному подвижному составу железных дорог с использованием метода Кларка – Райта. Актуальность исследования определяется необходимостью решения проблемы совмещения подвижных средств обслуживания (топливозаправщиков) с местами обслуживания (топливными базами) при минимизации логистических издержек.

На основе реальных данных участка Западно-Сибирской железной дороги построена матрица кратчайших расстояний между пятью станциями по автомобильным дорогам. Применен классический алгоритм Кларка – Райта (Clark – Wright Savings Algorithm), как один из наиболее эффективных методов для решения задачи маршрутизации транспорта с ограничениями вместимости. Алгоритм реализован на Python с пошаговой визуализацией процесса объединения маршрутов.

Метод Кларка – Райта позволил сократить количество топливозаправщиков с пяти (при индивидуальной доставке каждому клиенту) до двух, при общей протяженности маршрутов 86,9 км. Экономия количества транспортных средств составила 60 %, что приводит к значительному сокращению операционных расходов на содержание автопарка, оплату труда водителей и топливо.

Научная новизна работы состоит в применении классического алгоритма Кларка – Райта к специфической задаче оптимизации топливоснабжения специального подвижного состава железных дорог с подробной пошаговой реализацией и анализом результатов. Полученные результаты демонстрируют практическую эффективность метода и его применимость для железнодорожного транспорта. Предложенный подход может быть распространен на другие участки сети и модифицирован для учета динамических ограничений (временные окна, переменные объемы спроса).

Ключевые слова: оптимизация маршрутов, метод Кларка – Райта, Vehicle Routing Problem, топливозаправщики, железнодорожный транспорт, логистика, экономия ресурсов

Для цитирования: Оленберг А. А., Кочергин В. И., Корягин М. Е. Оптимизация маршрутов топливозаправщиков методом Кларка – Райта при эксплуатации путевых машин // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 2 (79). С. 13–22. DOI 10.52170/1815-9265_2026_79_13.

Original article

Route optimization for fuel delivery to railway transport using the Clarke – Wright method

Artur A. Olenberg¹, Viktor I. Kochergin^{2✉}, Mark E. Koryagin³

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

¹ snipe54@yandex.ru

² vkplus2011@yandex.ru✉

³ math@stu.ru

Abstract. This paper addresses the optimization of fuel and lubricating materials (FSM) delivery routes to special rolling stock on railways using the Clarke-Wright algorithm. The relevance of the study is determined by the need to solve the problem of combining mobile service vehicles (fuel tankers) with service locations (fuel depots) while minimizing logistics costs.

Based on real data from the West Siberian Railway section, a shortest distance matrix between five stations along road networks was constructed. The classical Clarke-Wright Savings Algorithm was applied – one of the most effective methods for solving vehicle routing problems with capacity constraints. The algorithm was implemented in Python with step-by-step visualization of the route merging process.

The Clarke-Wright method reduced the number of fuel tankers from five (individual delivery to each client) to two, with a total route length of 86,9 km. The savings in transport vehicles was 60 %, resulting in significant reductions in operating expenses for fleet maintenance, driver wages, and fuel consumption.

The scientific novelty of the work lies in applying the classical Clarke-Wright algorithm to the specific task of optimizing fuel supply to special rolling stock on railways with detailed step-by-step implementation and result analysis. The obtained results demonstrate the practical effectiveness of the method and its applicability to railway transport. The proposed approach can be extended to other network sections and modified to account for dynamic constraints (time windows, variable demand volumes).

Keywords: route optimization, Clarke – Wright algorithm, Vehicle Routing Problem, fuel tankers, railway transport, logistics, resource savings

For citation: Olenberg A. A., Kochergin V. I. Koryagin M. E. Route optimization for fuel delivery to railway transport using the Clarke – Wright method. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(79):13–22. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_79_13.

Введение

Обеспечение топливно-смазочными материалами (ТСМ) специального подвижного состава железных дорог является критической логистической задачей, от решения которой зависит эффективность работы всей транспортной системы [1]. Специальный подвижной состав требует регулярного пополнения запасов топлива на протяжении всего цикла эксплуатации. Традиционные подходы к организации топливоснабжения часто базируются на эмпирических решениях, не учитывающих оптимальное расположение топливозаправочных станций и рациональные маршруты доставки топливных ресурсов [2].

Проблема совмещения подвижных средств обслуживания (топливозаправщиков) с местами обслуживания (распределенными по сети железной дороги топливными базами) требует применения современных методов математической оптимизации. Неправильное решение этой задачи приводит к нерациональному использованию специализированного подвижного состава, увеличению транспортных и эксплуатационных расходов, а также снижению общей эффективности организации топливоснабжения железнодорожной инфраструктуры [3, 4].

Поставка топливно-смазочных материалов для железнодорожной инфраструктуры, как правило, осуществляется поставщиками по контрактам, предусматривающим доставку топлива непосредственно до линейных объектов эксплуатации. В стоимость таких поставок включаются расходы на транспортировку, экспедиционное обслуживание, использование подвижного состава и выполнение погрузочно-разгрузочных работ. В этих условиях эффективность организации маршрутов доставки становится важным фактором конкурентоспособности поставщиков топлива и может существенно влиять на итоговую стоимость логистических операций.

Методы исследования

Задача маршрутизации транспорта (Vehicle Routing Problem, VRP) была впервые сформулирована в 1959 г. при исследовании оптимизации доставки бензина к автозаправочным станциям [5]. С тех пор эта задача стала одной из центральных в исследовании логистических операций. Классические точные методы (линейное программирование, метод ветвей и границ) требуют экспоненциального времени вычислений при увеличении числа клиентов, что делает их непрактичными для реальных систем. Однако для средних размеров задач (от 50 до 100 клиентов) эти методы дают опорные точки для оценки качества эвристических решений [6, 7].

В 1964 г. был предложен эффективный алгоритм для решения задачи маршрутизации с ограничениями вместимости (Capacitated Vehicle Routing Problem, CVRP), получивший название метода Кларка – Райта [8, 9]. Алгоритм основан на концепции экономии – сокращении расстояний путем объединения отдельных маршрутов. Основная идея предложенного метода заключается в замене отправки отдельного транспортного средства каждому клиенту объединением нескольких клиентов в один маршрут для экономии пройденного расстояния. Экономия для каждой пары клиентов (i, j) может быть рассчитана по следующей формуле:

$$S(i, j) = d(0, i) + d(0, j) - d(i, j), \quad (1)$$

где $d(0, i)$ – расстояние от депо до клиента i ; $d(0, j)$ – расстояние от депо до клиента j ; $d(i, j)$ – расстояние между клиентами i и j .

Алгоритм Кларка – Райта итеративно объединяет маршруты в порядке убывания экономии при условии соблюдения ограничений вместимости и отличается простотой реализации, хорошим качеством достигаемых решений и легкостью адаптации к различным ограничениям [8–11]. Многочисленные исследования

показали эффективность данного метода на практике как для стандартных задач транспортной логистики [12], так и для гибридных подходов, сочетающих этот алгоритм с локальной оптимизацией [13, 14]. Особый интерес представляют примеры его использования в контексте доставки специализированных грузов, включая топливо, где достигается сокращение маршрутов на 15...25 % [15, 16].

Решение специализированных задач маршрутизации с ограничениями вместимости CVRP может происходить по нескольким направлениям, в том числе для грузов с дополнительными ограничениями по совместимости: VRP с временными окнами (VRPTW), где каждый клиент доступен в определенный интервал времени; многоуровневая задача VRP (MDVRP) для нескольких складов (баз); VRP с разделением доставки (SDVRP), когда один клиент может быть обслужен несколькими транспортными средствами. Полный обзор разновидностей VRP-задач представлен в работе [17]. Применительно к транспортной логистике на примере топливного снабжения в последние годы VRP активно применяется к оптимизации доставки топлива на автозаправочные станции, в аэропорты, на военные базы [18, 19]. Опыт применения имитационного моделирования на основе алгоритма Кларка – Райта для оптимизации логистики заправки транспорта показывает, что использование VRP в области доставки топлива позволяет сэкономить до 16 % от базовых расходов [20, 21].

Несмотря на широкое использование VRP в различных областях логистики, некоторые аспекты его применения остаются не вполне изученными. Во-первых, недостаточно исследована в настоящее время специфика железнодорожного транспорта с расположением цепочки станций вдоль линии [2, 3]. Во-вторых, не в полной мере разработаны вопросы интеграции с существующими геоинформационными системами и реальными дорожными сетями [22]. Кроме того, в большинстве известных работ в этой области знаний представляют только финальные результаты, без пошаговой демонстрации алгоритма и сравнения полученных результатов со статистикой реальных операций.

Цель данного исследования заключается в демонстрации эффективности метода Кларка – Райта при решении задачи оптимизации

маршрутов доставки топливно-смазочных материалов на склады ТСМ линейных предприятий железных дорог либо при необходимости непосредственно к местам заправки топливом специального железнодорожного подвижного состава. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: построить пример матрицы кратчайших расстояний между станциями на основе реальной дорожной сети и фактических расстояний по автомобильным дорогам; сформулировать задачу как CVRP с ограничениями вместимости топливозаправщиков; реализовать алгоритм Кларка – Райта с пошаговой визуализацией каждого этапа объединения маршрутов и провести анализ сходимости алгоритма и качества полученного решения; сравнить результаты оптимизации (количество маршрутов, общее расстояние) со сценарием «каждый клиент отдельно» и оценить экономический эффект и практическую применимость алгоритма для железнодорожного транспорта.

Результаты исследования

Исследование проведено на примере участка полигона Западно-Сибирской железной дороги. На основе использования сервиса «Яндекс Карты» [23] были определены кратчайшие расстояния по автомобильным дорогам между станциями (рисунок). Для демонстрации работы метода был рассмотрен условный пример, включающий пять пунктов: одну нефтебазу, выступающую в роли базы отправления, и четыре железнодорожные станции, на которых расположены склады ТСМ, требующие регулярного пополнения запасов топлива.

Входными данными для расчета являются:

- количество станций (включая базовую) $n = 5$, из которых станция 0 – база/склад, станции 1...4 – потребители;
- вместимость каждого топливозаправщика в условных единицах топлива $Q = 2$;
- спрос каждого потребителя равен одной условной единице (равномерный спрос);
- реальные дорожные расстояния в км по автомобильным дорогам на основе данных сервиса «Яндекс Карты» [23], матрица расстояний представлена в табл. 1.

Транспортная задача в данном случае формализуется как задача маршрутизации с ограничениями вместимости (CVRP) [8, 9]. В качестве исходных данных выступают: граф $G = (V, E)$,

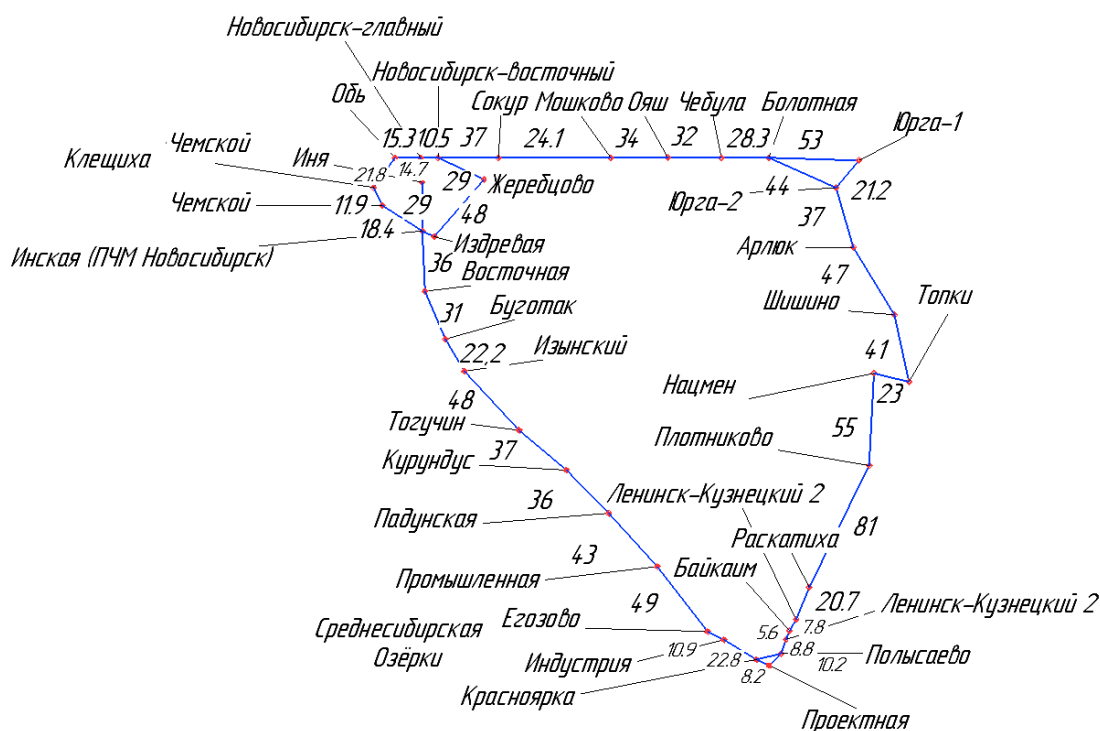


Схема кратчайших расстояний между станциями

Таблица 1

Матрица расстояний между станциями, км

Станция	0 (база)	1	2	3	4
0 (база)	0,0	15,3	25,8	62,8	86,9
1	15,3	0,0	10,5	47,5	71,6
2	25,8	10,5	0,0	37,0	61,1
3	62,8	47,5	37,0	0,0	24,1
4	86,9	71,6	61,1	24,1	0,0

где $V = 0, 1, 2, \dots, n$ – множество вершин (станции); E – множество ребер (дороги); $d(i, j)$ – расстояние между вершинами i и j ; Q – вместимость каждого транспортного средства; d_i – спрос в вершине i (для депо: $d_0 = 0$); d_j – спрос в вершине j . Для решения задачи требуется найти набор маршрутов $\{R_1, R_2, \dots, R_k\}$, где каждый маршрут $R_k = (0, i_1, i_2, \dots, i_m, 0)$ начинается и заканчивается в депо, обслуживает подмножество клиентов и минимизирует функцию:

$$\text{Minimize } \sum_{k=1}^K \sum_{i,j \in R_k} d(i, j). \quad (2)$$

Ограничениями при этом являются следующие условия: каждый клиент обслуживается ровно один раз; сумма спросов в каждом маршруте должна быть меньше величины вместимости Q или равна ей; маршруты должны быть связными (пути, соединенные в одно целое). Пошаговое применение алгоритма Кларка – Райта для решения поставлен-

ной задачи предполагает выполнение приведенных далее этапов расчета.

Шаг 0 (инициализация) – вычисление экономии для всех пар клиентов (i, j) , $i \neq j$ по формуле (1) и сортировка пар по убыванию экономии.

Шаг 1 (формирование начальных маршрутов) – создание начального набора маршрутов при выполнении условия «каждый клиент – отдельный маршрут»: $\{0 \rightarrow i \rightarrow 0\}$.

Шаг 2 – итеративное объединение маршрутов для каждой пары клиентов (i, j) в порядке убывания экономии. Для объединения необходимо, чтобы рассматриваемые клиенты i и j находились на разных маршрутах, оба клиента являлись концами своих маршрутов, а сумма спросов не превышала заданную величину Q .

Шаг 3 (остановка) выполняется, когда все пары со значимой экономией обработаны.

Сложность оценивается выражением $O(n^2 \log n)$, причем для вычисления экономии $+ O(n^2)$, а для объединения маршрутов $= O(n^2)$.

К преимуществам применения данного алгоритма относятся: простая реализация; хорошее качество решений на практике (обычно 10...15 % от оптимума); легкая адаптация к дополнительным ограничениям. Недостатками являются: отсутствие гарантии достижения оптимального решения; зависимость результатов от порядка обработки пар и возможная потребность в дальнейшей локальной оптимизации (2-opt, 3-opt).

Алгоритм реализован на языке программирования Python 3.8+ с использованием стандартных библиотек. Код включает пошаговый вывод каждого решения, позволяющий отследить процесс объединения маршрутов. На первом этапе по формуле (1) и представленной в табл. 1 матрице вычислена экономия для всех пар клиентов. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Наибольшая полученная экономия (125,6 км) достигается при объединении клиентов 3 и 4. Это объясняется тем, что они находятся близко друг к другу (расстояние 24,1 км) и на значительном удалении от депо. Исходное состояние – каждый клиент обслуживается отдельным маршрутом. Вначале рассчитываем каждого клиента «отдельно», т. е. идем от базы до клиента напрямую, каждый раз начиная с одной точки и возвращаясь в нее обратно с загрузкой 1. Поскольку один клиент

у нас соответствует одной загрузке, вместимость принимаем равной двум. В этом случае мы просто условно «ходим» до клиента и обратно, без оптимизации методом Кларка – Райта.

Маршрут 1: $0 \rightarrow 1 \rightarrow 0$; расстояние = $15,3 + 15,3 = 30,6$ км; загрузка = 1.

Маршрут 2: $0 \rightarrow 2 \rightarrow 0$; расстояние = $25,8 + 25,8 = 51,6$ км; загрузка = 1.

Маршрут 3: $0 \rightarrow 3 \rightarrow 0$; расстояние = $62,8 + 62,8 = 125,6$ км; загрузка = 1.

Маршрут 4: $0 \rightarrow 4 \rightarrow 0$; расстояние = $86,9 + 86,9 = 173,8$ км; загрузка = 1.

Используя полученные данные, считаем общую сумму маршрута для каждого клиента отдельно.

Общее расстояние составит: $30,6 + 51,6 + 125,6 + 173,8 = 381,6$ км.

При рассмотрении пары (3, 4) определяем, что клиенты находятся на разных маршрутах, являются их концами, а суммарная загрузка составляет $2 \leq Q$, это позволяет объединить маршруты в $\{0 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 0\}$. Для пар (2, 3) и (2, 4) объединение невозможно вследствие превышения вместимости либо несоблюдения условия расположения клиентов на концах маршрутов. Пара (1, 2) удовлетворяет всем условиям, поэтому соответствующие маршруты объединяются в $\{0 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 0\}$. Сравнение результатов при расчете «каждый клиент отдельно» и методом Кларка – Райта приведено в табл. 3.

Таблица 2

Экономия для всех пар клиентов (сортировка по убыванию)

Пара клиентов	Экономия, км	Ранг
(3, 4)	125,6	1
(2, 3)	51,6	2
(2, 4)	51,6	3
(1, 2)	30,6	4
(1, 3)	30,6	5
(1, 4)	30,6	6

Таблица 3

Сравнение результатов при расчете «каждый клиент отдельно» и методом Кларка – Райта

Параметр	Индивидуальные маршруты	Оптимизированные маршруты (по методу Кларка – Райта)	Сокращение, %
Количество маршрутов	5	2	60
Общее расстояние, км	381,6	225,4	40,9
Среднее расстояние на маршрут, км	76,3	112,7	–47,8
Требуемое количество топливозаправщиков	5	2	60
Требуемое количество водителей	5	2	60

Примечание. Увеличение среднего расстояния маршрута объясняется тем, что два оптимизированных маршрута служат двум парам клиентов, а не одному.

Итоговым решением, полученным в результате применения алгоритма Кларка – Райта, являются два маршрута:

– маршрут А: $\{0 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 0\}$ с длиной 51,6 км и загрузкой 2;

– маршрут В: $\{0 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 0\}$ с длиной 173,8 км и загрузкой 2.

Общее расстояние после оптимизации составляет 225,4 км, что соответствует сокращению на 156,2 км (40,9 %) по сравнению с исходным решением. Количество маршрутов уменьшилось с четырех до двух, что эквивалентно сокращению используемого парка транспортных средств на 60 %.

Полученное решение рассмотрено со следующих точек зрения:

1. Уровень использования вместимости: оба маршрута используют вместимость на 100 % (две единицы из двух возможных), что свидетельствует об эффективном использовании ресурсов.

2. Возможность улучшений локальной оптимизацией (2-орт):

– для маршрута А $\{0 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 0\}$: альтернативный порядок $\{0 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 0\}$ дает расстояние $25,8 + 10,5 + 15,3 = 51,6$ км (то же самое);

– для маршрута В $\{0 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 0\}$: альтернативный порядок $\{0 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 0\}$ дает расстояние $86,9 + 24,1 + 62,8 = 173,8$ км (то же самое).

2-орт – это локальная оптимизация, т. е. мы пробуем улучшить порядок посещения точек внутри маршрута, заменяя два ребра для уменьшения длины. Получается то же самое: матрица симметрична, т. е. $d(i,j) = d(j,i)$, а в расчете суммы значения просто переставлены местами, при двух клиентах это наиболее частая ситуация. В итоге оба маршрута уже локально оптимальны (2-орт не дает улучшений).

3. Сравнение с нижней границей, которая для CVRP рассчитывается как половина суммы расстояний в км от всех клиентов до депо и обратно, разделенная на вместимость:

$$LB = \frac{\sum_{i=1}^n 2 d(0, i)/Q = 2(15,3 + 25,8 + 62,8 + 86,9)}{2} = 190,8. \quad (3)$$

Нижняя граница LB представляет собой самое оптимистическое расстояние, меньше которого решение физически невозможно.

Элемент $2d(0, i)$ в выражении (3) – это минимальный вклад клиента i в общее расстояние в любом допустимом решении, заключающемся в следующем: один раз нужно выехать из базы, один раз вернуться обратно. Значения расстояний берутся из табл. 1. Затем производится деление на Q : один рейс обслуживает максимум Q клиентов, а значит, общие затраты рейса делятся между этими клиентами.

Полученное решение – 225,4 км находится на 18,1 % выше нижней границы, что является хорошим результатом для эвристического метода (теоретически метод Кларка – Райта находит решения в пределах 10...25 % от оптимума). Применение алгоритма Кларка – Райта к задаче оптимизации маршрутов топливозаправщиков дало следующие результаты:

1. Значительное сокращение парка транспортных средств: удалось сократить маршруты с пяти независимых до двух и получить экономию 60 % в количестве топливозаправщиков. Для крупных железнодорожных сетей это означает снижение эксплуатационных затрат, связанных с организацией доставки топливно-смазочных материалов и использованием специализированных средств обслуживания.

2. Сокращение общего пробега топливозаправщиков в размере 156,2 км (40,9 %), что способствует прямому снижению расходов на топливо, амортизацию и обслуживание автопарка транспортного подвижного состава. При цене дизельного топлива около 50 р./л и среднем расходе топлива при эксплуатации топливозаправщиков 20–50 л / 100 км экономия топливно-энергетических ресурсов может составлять порядка 1 500–4 000 р. на одном цикле обслуживания.

3. Полное использование вместимости: оба маршрута используют вместимость транспорта на 100 %, что указывает на высокую эффективность распределения.

4. Локальная оптимальность: дальнейшая локальная оптимизация методом 2-орт не улучшает решение, это говорит о том, что локально оптимальное решение уже найдено.

Сравнение результатов применения метода Кларка – Райта с другими известными подходами к решению транспортных задач приведено в табл. 4.

Метод Кларка – Райта в сравнении с другими известными подходами

Характеристика	Жадный алгоритм (Nearest Neighbor)	Метод Кларка – Райта	Генетический алгоритм	Муравьиная колония
Временная сложность	$O(n^2)$	$O(n^2)$	$O(n \cdot p \cdot g)$	$O(n^2 \cdot m)$
Качество решения	15...20 % выше оптимума	10...15 % выше оптимума	5...10 % выше оптимума	5...10 % выше оптимума
Легкость реализации	Очень простая	Простая	Средняя	Средняя
Требуемые ресурсы	Минимальные	Минимальные	Значительные	Значительные
Адаптируемость к ограничениям	Хорошая	Отличная	Отличная	Отличная
Стабильность результатов	Зависит от начальной точки	Детерминирован	Недетерминирован	

Выводы

В статье продемонстрирована эффективность применения классического алгоритма Кларка – Райта для оптимизации маршрутов доставки топливно-смазочных материалов специальному подвижному составу на примере одного из участков полигона Западно-Сибирской железной дороги. Основные результаты применения данного алгоритма:

- сокращено количество требуемых топливозаправщиков на 60 % (с 5 до 2);
- сокращен общий пробег топливозаправщиков на 40,9 % (с 381,6 до 225,4 км);
- выявлена локальная оптимальность полученного решения (при 2-орт улучшений нет);
- качество решения находится в пределах 18,1 % от расчетной нижней границы, что является хорошим результатом для эвристического подхода.

Представленная работа демонстрирует пример пошаговой реализации алгоритма Кларка – Райта с описанием каждого этапа, что облегчает понимание сущности метода практикующими специалистами железнодорожного транспорта и студентами. Практическая значимость результатов исследования заключается в возможности внедрения данной методики в системы управления повседневной логистикой топливозаправщиков железнодорожных предприятий. Для реализации алгоритма возможно использование платформы для программирования и численных вычислений MATLAB [24] или других платформ для имитационного моделирования логистических потоков и проверки результатов оптимизации в более реалистичных условиях [25–27].

Список источников

1. Оленберг А. А., Кочергин В. И. Интегрированное оптимизационное моделирование логистики топливозаправщиков в транспортных и транспортно-технологических системах // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2025. № 2 (17). С. 59–65. DOI 10.52170/2712-9195_2025_2_59. EDN HBIILZZ.
2. Оленберг А. А., Кочергин В. И. Использование ГИС карт для создания имитационной модели // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2024. № 3 (14). С. 56–61. DOI 10.52170/2712-9195_2024_3_56. EDN BYVGVU.
3. Clarke G., Wright W. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points // Operations Research. 1964. No. 12 (4). P. 568–581. DOI 10.1287/opre.12.4.568.
4. Laporte G. The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms // European Journal of Operational Research. 1992. No. 59 (3). P. 345–358. DOI 10.1016/0377-2217(92)90192-C.
5. Dantzig G. B., Ramser J. H. The truck dispatching problem // Management Science. 1959. No. 6 (1). P. 80–91. DOI 10.1287/mnsc.6.1.80.
6. Toth P., Vigo D. The vehicle routing problem. SIAM, 2002. 367 p. DOI 10.1137/1.9780898718515.
7. Baldacci R., Mingozzi A., Roberti R. Recent exact algorithms for solving the vehicle routing problem under capacity and time window constraints // European Journal of Operational Research. 2012. No. 218 (1). P. 1–6. DOI 10.1016/j.ejor.2011.07.037.
8. Guerriero F., Saccomanno F. P. A Parallel implementation of the Clarke-Wright algorithm on GPUS // 14th International Conference on Operations Research and Enterprise Systems. 2025. No. 1. P. 100–111. DOI 10.5220/0013138100003893.

9. Garside A. K., Erlinda L., Amallynda I. Solving heterogeneous fleet vehicle routing problem with Clarke Wright saving heuristic and genetic algorithm // *Proceedings of the 4th International Conference on Green Civil and Environmental Engineering (GCEE)* 2023. 2024. No. 2927. P. 050002. DOI 10.1063/5.0192216.
10. Fikejz J., Brázdová M., Jánošíková L. Modification of the Clarke and Wright algorithm with a dynamic savings matrix // *Journal of Advanced Transportation*. 2024. No. 2024 (1). P. 1–15. DOI 10.1155/2024/8753106.
11. Selecting fast algorithms for the capacitated vehicle routing problem with machine learning techniques / R. Asin-Achá, A. Espinoza, O. Goldschmidt [et al.] // *Networks*. 2024. No. 84 (4). P. 465–480. DOI 10.1002/net.22244.
12. Segerstedt A. A simple heuristic for vehicle routing – A variant of Clarke and Wright's saving method // *International Journal of Production Economics*. 2014. No. 157. P. 74–79. DOI 10.1016/j.ijpe.2013.09.017.
13. Heuristics for vehicle routing problem: A survey and recent advances / F. Liu, C. Lu, L. Gui [et al.] // *Artificial Intelligence*. 2023. DOI 10.48550/arXiv.2303.04147.
14. CAMP: Collaborative attention model with profiles for vehicle routing problems / C. Hua, F. Berto, J. Son [et al.] // *Multiagent Systems*. 2025. DOI 10.48550/arXiv.2501.02977.
15. Nurcahyo R., Irawan D. A., Kristanti F. The Effectiveness of the Clarke & Wright savings algorithm in determining logistics distribution routes (case study PT.XYZ) // *E3S Web of Conferences*. 2023. No. 426 (01107). DOI 10.1051/e3sconf/202342601107.
16. Nugroho J. A. Penentuan Rute Pengambilan Sampah Dengan Menggunakan Metode Clarke & Wright Algorithm Saving Heuristic Di Perusahaan Daerah Kebersihan Untuk Wilayah Bandung Timur // *Journal Pendidikan Sains Dan Teknologi*. 2024. No. 3 (3). P. 569–573. DOI 10.47233/jpst.v3i3.1984.
17. Vehicle routing problems with multiple commodities: A survey / W. Gu, C. Archetti, D. Cattaruzza [et al.] // *European Journal of Operational Research*. 2024. No. 317 (1). P. 1–15. DOI 10.1016/j.ejor.2023.11.032.
18. A machine learning optimization approach for last-mile delivery and third-party logistics / M. E. Bruni, E. Fadda, S. Fedorov, G. Perboli // *Computers & Operations Research*. 2023. No. 157 (20). DOI 10.1016/j.cor.2023.106262.
19. Analysis and optimization of transportation logistics for supply chain management of perishable goods using Monte Carlo Simulation / S. M. Pol, A. Rayte, B. T. Patil, K. N. Joshi // *E3S Web of Conferences*. 2024. No. 559 (04004). DOI 10.1051/e3sconf/202455904004.
20. Vehicle routing problem approach for improving fuel delivery scheduling to austere test sites / S. Allen, J. Heller, G. Lamb [et al.] // *A Regional Conference of the Society for Industrial and Systems Engineering*. 2024. No. 12 (2). P. 109–114. DOI 10.37266/ISER.2025v12i2.pp109-114.
21. Kaczor G., Szkoda M. The application of a simulation method in the evaluation of the reliability of transport systems // *Czasopismo Techniczne*. 2018. No. 6 (115). P. 167–178. DOI 10.4467/2353737XCT.18.096.8701.
22. Qu P. Design of supply chain logistics intelligent management information system based on GIS optimization model // *Procedia Computer Science*. 2024. No. 243. P. 396–405. DOI 10.1016/j.procs.2024.09.049.
23. Яндекс Карты : [поисково-информационная картографическая служба]. URL: <https://yandex.ru/maps> (дата обращения: 01.02.2026).
24. MATLAB : платформа для программирования и численных вычислений. URL: <https://www.math-works.com/products/matlab.html> (дата обращения: 01.02.2026).
25. Wang R. Research on cold chain logistics distribution path optimization based on improved ant colony algorithm // *2023 IEEE 3rd International Conference on Power, Electronics and Computer Applications (ICPECA)*. 2023. DOI 10.1109/ICPECA56706.2023.10075989.
26. Li Y., Zhang Z. Research on the site selection of fresh agricultural products distribution center based on logistics cost and its MATLAB implementation // *AICI 25: Proceedings of the 2025 International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence*. 2025. P. 293–297. DOI doi.org/10.1145/3730436.3730485.
27. Zhang W., Xu M., Wang S. Joint location and pricing optimization of self-service in urban logistics considering customers' choice behavior // *Transportation Research. Part E. Logistics and Transportation Review*. 2023. No. 174. DOI 10.1016/j.tre.2023.103128.

References

1. Olenberg A. A., Kochergin, V. I. Integrated optimization modeling of fuel tanker logistics in transport and transport-technological systems. *Fundamental and Applied Transport Issues*. 2025;(17):59–65. (In Russ.). DOI 10.52170/2712-9195_2025_2_59 EDN HBILZZ.
2. Olenberg A. A., Kochergin V. I. Use of GIS maps to create a simulation model. *Fundamental and Applied Transport Issues*. 2024;(14):56–61. DOI 10.52170/2712-9195_2024_3_56 EDN BYVGVU. (In Russ.).
3. Clarke G., Wright W. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*. 1964;12(4):568–581. DOI 10.1287/opre.12.4.568.

4. Laporte G. The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*. 1992;59(3):345–358. DOI 10.1016/0377-2217(92)90192-C.
5. Dantzig G. B., Ramser J. H. The truck dispatching problem. *Management Science*. 1959; 6(1):80–91. DOI 10.1287/mnsc.6.1.80.
6. Toth P., Vigo D. The vehicle routing problem. SIAM; 2002. 367 p. DOI 10.1137/1.9780898718515.
7. Baldacci R., Mingozzi A., Roberti R. Recent exact algorithms for solving the vehicle routing problem under capacity and time window constraints. *European Journal of Operational Research*. 2012;218(1):1–6. DOI 10.1016/j.ejor.2011.07.037.
8. Guerriero F., Saccomanno F. P. A Parallel implementation of the Clarke-Wright algorithm on GPUs. Conference: *14th International Conference on Operations Research and Enterprise Systems*. 2025;(1):100–111. DOI 10.5220/0013138100003893.
9. Garside A. K., Erlinda L., Amallynda I. Solving heterogeneous fleet vehicle routing problem with Clarke Wright saving heuristic and genetic algorithm. *Proceedings of the 4th international Conference on green Civil and environmental Engineering (GCEE) 2023*. 2024;(2927):050002. DOI 10.1063/5.0192216.
10. Fikejz J., Brázdová M., Jánošíková L. Modification of the Clarke and Wright algorithm with a dynamic savings matrix. *Journal of Advanced Transportation*. 2024;(1):1–15. DOI 10.1155/2024/8753106.
11. Asín-Achá R., Espinoza A., Goldschmidt O., Hochbaum D.S., Huerta I.I. Selecting fast algorithms for the capacitated vehicle routing problem with machine learning techniques. *Networks*. 2024;84(4):465–480. DOI 10.1002/net.22244.
12. Segerstedt A. A simple heuristic for vehicle routing – A variant of Clarke and Wright's saving method. *International Journal of Production Economics*. 2014;(157):74–79. DOI 10.1016/j.ijpe.2013.09.017.
13. Liu F., Lu C., Gui L. [et al.]. Heuristics for vehicle routing problem: A survey and recent advances. *Artificial Intelligence*. 2023. DOI 10.48550/arXiv.2303.04147.
14. Hua C., Berto F., Son J. [et al.]. CAMP: Collaborative attention model with profiles for vehicle routing problems. *Multiagent Systems*. 2025. DOI 10.48550/arXiv.2501.02977.
15. Nurcahyo R., Irawan D. A., Kristanti F. The effectiveness of the Clarke & Wright savings algorithm in determining logistics distribution routes (case study PT.XYZ). *E3S Web of Conferences*. 2023;426(01107). DOI 10.1051/e3sconf/202342601107.
16. Nugroho J. A. Penentuan Rute Pengambilan Sampah Dengan Menggunakan Metode Clarke & Wright Algorithm Saving Heuristic Di Perusahaan Daerah Kebersihan Untuk Wilayah Bandung Timur. *Journal Pendidikan Sains Dan Teknologi*. 2024;3(3):569–573. DOI 10.47233/jpst.v3i3.1984.
17. Gu W., Archetti C., Cattaruzza D. [et al.]. Vehicle routing problems with multiple commodities: A survey. *European Journal of Operational Research*. 2024;317(1):1–15. DOI 10.1016/j.ejor.2023.11.032.
18. Bruni M. E., Fadda E., Fedorov S., Perboli G. A machine learning optimization approach for last-mile delivery and third-party logistics. *Computers & Operations Research*. 2023;157(20). DOI 10.1016/j.cor.2023.106262.
19. Pol S. M., Rayte A., Patil B. T., Joshi K. N. Analysis and optimization of transportation logistics for supply chain management of perishable goods using monte carlo simulation. *E3S Web of Conferences*. 2024;559(04004). DOI 10.1051/e3sconf/202455904004.
20. Allen S., Heller J., Lamb G. [et al.]. Vehicle routing problem approach for improving fuel delivery scheduling to austere test sites. *A Regional Conference of the Society for Industrial and Systems Engineering*. 2024;12(2):109–114. DOI 10.37266/ISER.2025v12i2.pp109-114.
21. Kaczor G., Szkoda M. The application of a simulation method in the evaluation of the reliability of transport systems. *Czasopismo Techniczne*. 2018;6(115):167–178. DOI 10.4467/2353737XCT.18.096.8701.
22. Qu P. Design of supply chain logistics intelligent management information system based on GIS optimization model. *Procedia Computer Science*. 2024;243:396–405. DOI 10.1016/j.procs.2024.09.049.
23. Search and information cartographic service Yandex Maps. URL: <https://yandex.ru/maps..>
24. MATLAB programming and numerical computing platform. URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.
25. Wang R. Research on cold chain logistics distribution path optimization based on improved ant colony algorithm. *2023 IEEE 3rd International Conference on Power, Electronics and Computer Applications (ICPECA)*. 2023. DOI 10.1109/ICPECA56706.2023.10075989.
26. Li Y., Zhang Z. Research on the site selection of fresh agricultural products distribution center based on logistics cost and its MATLAB implementation. *AICI '25: Proceedings of the 2025 International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence*. 2025:293–297. DOI doi.org/10.1145/3730436.3730485.
27. Zhang W., Xu M., Wang S. Joint location and pricing optimization of self-service in urban logistics considering customers' choice behavior. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2023;174. DOI 10.1016/j.tre.2023.103128.

Информация об авторах

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

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

М. Е. Корягин – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Высшая математика» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

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

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

M. E. Koryagin – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Higher Mathematics Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 22.01.2026; одобрена после рецензирования 01.03.2026; принята к публикации 31.03.2026.

The article was submitted 22.01.2026; approved after reviewing 01.03.2026; accepted for publication 31.03.2026.

Научная статья

УДК 625.1

doi:10.52170/1815-9265_2026_79_23

Обоснование необходимости дополнительных критериев назначения планово-предупредительной выправки пути на основе спектрального анализа вертикальных неровностей рельсовой колеи

Алексей Леонидович Ланис^{1✉}, Никита Сергеевич Вихт²,
Александр Александрович Севостьянов³

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

¹ alangeo@bk.ru✉

² nikitaviht@yandex.ru

³ seva2233@yandex.ru

Аннотация. В данной статье обоснована необходимость использования спектральных показателей вертикальных неровностей рельсовой колеи в качестве дополнительных диагностических признаков при назначении планово-предупредительной выправки пути на особо грузонапряженных линиях. Выполнен анализ действующих критериев выправки, установленных правилами назначения ремонтов.

Предложены авторские спектральные показатели: энергия коротких волн (диапазоны D0–D1 по классификации EN 13848), индекс системной деградации и доминирующая длина волны. Для верификации использованы модельные данные, генерированные суперпозицией гармоник с заданным распределением энергии по диапазонам. Восстановление натурного профиля выполнено с помощью быстрого преобразования Фурье и обратной передаточной функции хордальной системы.

Показано, что действующий критерий (количество отступлений 2-й степени за три весенних месяца) имеет реактивный характер и не учитывает пространственную структуру неровностей. Статистический анализ 3205 км Транссибирской магистрали подтвердил, что лишь 25,6 % отступлений фиксируется весной.

Предложенные показатели позволили надежно дифференцировать модельные сценарии: для сценария с преобладанием коротких волн (балластные дефекты) энергия коротких волн составила 77 % от общей, доминирующая длина волны – 2,78 м; для сценария с длинными волнами (системные деформации земляного полотна) – 20 % и 125 м соответственно. При условно одинаковом числе отступлений (25 шт./км) традиционный подход назначает выправку обоим участкам, тогда как спектральный анализ рекомендует дополнительную диагностику для сценария с системными деформациями, что позволит избежать неэффективных затрат. Результаты могут быть использованы в системах диагностики и планирования ремонтов железнодорожного пути, особенно в условиях сокращения инвестиционных программ ОАО «РЖД».

Полученные результаты обосновывают необходимость включения спектрального анализа вертикальных неровностей в систему дополнительных критериев при планировании планово-предупредительной выправки. Дальнейшие исследования направлены на выявление критических скоростей роста энергии коротких волн для упреждающего назначения выправки.

Ключевые слова: геометрия рельсовой колеи, вертикальные неровности, спектральный анализ, планово-предупредительная выправка, балластные дефекты, земляное полотно

Для цитирования: Ланис А. Л., Вихт Н. С., Севостьянов А. А. Обоснование необходимости дополнительных критериев назначения планово-предупредительной выправки пути на основе спектрального анализа вертикальных неровностей рельсовой колеи // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 2 (79). С. 23–32. DOI 10.52170/1815-9265_2026_79_23.

Original article

Justification of the need for additional criteria for scheduling preventive track surfacing based on spectral analysis of vertical irregularities in the track gauge

Alexey L. Lanis^{1✉}, Nikita S. Vikht², Alexander A. Sevostyanov³

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

¹ alangeo@bk.ru✉

² nikitaviht@yandex.ru

³ seva2233@yandex.ru

Abstract. This article justifies the need to use spectral indicators of vertical rail track irregularities as additional diagnostic features when assigning scheduled preventive track surfacing on lines with particularly heavy loads. An analysis of the current B criteria established by the Rules for Assigning Repairs has been performed.

The authors propose their own spectral indicators: short wave energy (ranges D0–D1 according to EN 13848 classification), system degradation index, and dominant wavelength. Model data generated by superposition of harmonics with a given energy distribution across ranges was used for verification. The full-scale profile was restored using fast Fourier transform and the inverse transfer function of the chordal system.

It is shown that the current criterion (the number of second-degree deviations over three spring months) is reactive in nature and does not consider the spatial structure of irregularities. Statistical analysis of 3,205 km of the Trans-Siberian Railway confirmed that only 25.6% of deviations are recorded in spring.

The proposed indicators made it possible to reliably differentiate between model scenarios: for the scenario with a predominance of short waves (ballast defects), the energy of short waves accounted for 77% of the total, with a dominant wavelength of 2.78 m; for the scenario with long waves (systemic deformations of the subgrade), it was 20% and 125 m, respectively. With a conditionally equal number of deviations (25 per km), the traditional approach assigns both sections, while spectral analysis recommends additional diagnostics for the scenario with systemic deformations, which avoids inefficient costs. The results can be used in railway track diagnosis and repair planning systems, especially in the context of reduced investment programs by Russian Railways.

The results obtained justify the need to include spectral analysis of vertical irregularities in the system of additional criteria when planning repairs. Further research is aimed at identifying critical short-wave energy growth rates for proactive repair scheduling.

Keywords: rail track geometry, vertical irregularities, spectral analysis, scheduling preventive surfacing, ballast defects, roadbed

For citation: Lanis A. L., Vikht N. S., Sevostyanov A. A. Justification of the need for additional criteria for scheduling preventive track surfacing based on spectral analysis of vertical irregularities in the track gauge. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(79):23–32. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_79_23.

Введение

Безопасность движения и надежность эксплуатации железнодорожного пути в значительной степени определяются качеством геометрии рельсовой колеи (ГРК). Согласно отчетным данным Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры за 2025 г. зафиксировано 27 нарушений безопасности движения, из которых 18 отнесены к ответственности службы пути, а 14 классифицированы как сходы подвижного состава при маневровых работах по причине несоответствия параметров ГРК [1]. Это подтверждает высокую чувствительность показателей безопасности к состоянию рельсовой колеи и необходимость совершенствования методов ее диагностики и обслуживания [2].

В работе [3] выявлена необходимость пересмотра существующих требований к оценке геометрии рельсовой колеи с учетом влияния коротковолновых неровностей. В частности, показано, что вертикальные неровности продольного профиля с длинами волн 0,44–1,48 м в зоне сопряжения элементов рамы тележки электропоезда «Ласточка» вызывают напряжения до 33 МПа, что составляет порядка 67 % от максимальных зарегистрированных значений в рассматриваемых элементах конструкции [3]. Также установлено, что вертикальные неровности пути в диапазоне длин волн 0,5–1,5 м формируют до 70 % напряженного состояния обрессоренных несущих элементов тележек тягового подвижного состава [4].

В действующих отечественных нормативных документах оценка коротковолновых неровностей с длинами волн менее 3 м отсутствует, что снижает полноту контроля состояния пути и может негативно отражаться на ресурсе элементов верхнего строения и подвижного состава. Дополнительно установлено, что применяемые методики регистрации параметров ГРК в ряде случаев не обеспечивают корректную фиксацию неровностей указанного диапазона [5].

Ограничения существующих подходов во многом связаны с использованием хордового метода в качестве способа получения данных о неровностях пути, затрудняющего идентификацию коротковолновых составляющих продольного профиля. В европейской практике, напротив, акцент делается на цифровой спектральной обработке измерительных сигналов и выделении неровностей в заданных диапазонах длин волн [6].

Так, в европейских странах широко применяются нормативы, основанные на спектральных плотностях мощности неровностей ГРК. Вертикальные неровности разделяются на составляющие соответствующего диапазона длин волн (табл. 1). Для выявления их из процесса регистрации мобильными путеизмерительными средствами используются такие методы фильтрации, как фильтр Чебышева (для диапазона D1) и метод обратного преобразования Фурье. Зарубежная практика демонстрирует эффектив-

ность спектрального анализа продольного профиля пути через спектральную плотность мощности неровностей в различных диапазонах длин волн. Такой подход позволяет выявлять доминирующие пространственные масштабы деформаций пути, связывать их с возможными причинами возникновения и оценивать влияние неровностей на безопасность движения и плавность хода поездов [7].

Так, для восстановления равноупругости подшпального основания, уменьшения неравномерности отступлений по уровню и в плане, а также устранения просадок применяется плано-предупредительная выправка пути (ППВ). Согласно инструкции [8] основным критерием назначения ППВ является количество отступлений 2-й степени вертикальных неровностей ГРК в среднем за последние три весенних месяца (табл. 2).

Данный параметр связан с тем, что в период зимних работ выправка пути в плане должна осуществляться только с применением регулировочных прокладок, которые ликвидируются в весенний период перед плановыми работами по

выправке пути с использованием машин или электрошпалоподбоек [8, 9].

Однако, как показано в ряде исследований [3, 10, 11], такой подход обладает существенными недостатками:

- реагирует на уже накопившиеся отклонения (реактивный характер);
- не учитывает пространственную структуру неровностей, что не позволяет выявить участки, где деградация переходит в ускоренную фазу;
- использует усредненные сезонные критерии, не отражающие реальную динамику расстройств.

Так, например, проведенный автором анализ состояния n км Транссибирской магистрали за 2021–2025 гг. показал, что лишь 25,6 % отступлений 2-й степени приходится на весенний период, тогда как основная доля (34,5 %) фиксируется летом. Это ставит под сомнение обоснованность выбора весеннего периода как единственного основания для назначения ППВ и подтверждает необходимость поиска дополнительных диагностических признаков, не зависящих от сезона (рис. 1).

Таблица 1

Классификация диапазонов длин волн согласно стандарту EN 13848 [12]

Категория	Диапазон длин волн, м	Примечание
D0	$1 < \lambda \leq 5$ (опционально*)	Создают высокие динамические нагрузки
D1	$3 < \lambda \leq 25$	Влияют на безопасность движения
D2	$25 < \lambda \leq 70$	Влияют на комфорт пассажиров
D3	$70 < \lambda \leq 150^{**}$	

* Используется дополнительно для определения неисправностей, вызывающих повышенные динамические воздействия на подвижной состав.

** Для горизонтальных (профильных) неровностей длина волны составляет 200 м.

Таблица 2

Критерии назначения ППВ для особо грузонапряженной линии

Критерий	Значение критерия по классам пути				
	1	2	3	4	5
Основной критерий					
О*	20	20	–	–	–
Дополнительные критерии					
Количество негодных шпал, % более	10	10	15	20	По усмотрению начальника дистанции пути (инфраструктуры)
Количество негодных узлов скреплений, % более	10	10	15	20	
Или загрязненность балласта, %	Не более 10				
При снижении показателя СССП на км/ч	5	5	7	7	–
Критерий УПРАН					
Индекс предотказов	Более 0,18	Более 0,18	Более 0,3	Более 0,4	По усмотрению начальника дистанции пути (инфраструктуры)

* Количество отступлений 2-й степени шт./км в расчете на месяц в среднем за три последних весенних месяца без учета отступлений по ширине колеи для линий.

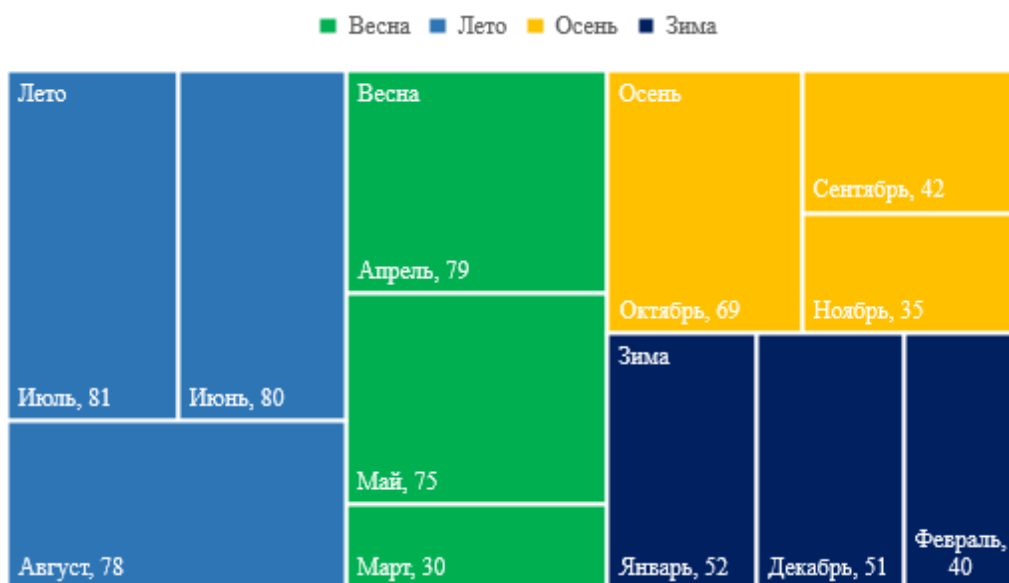


Рис. 1. Доля отступлений 2-й степени на n км по сезонам года

Особую остроту проблема повышения эффективности планирования путевых работ приобретает в условиях сокращения инвестиционных программ ОАО «РЖД». Согласно утвержденным бюджетам объем инвестиций в 2024 г. составил 1 275,4 млрд р., в 2025 г. – 890,9 млрд р., а на 2026 г. запланировано лишь 713,6 млрд р. [11, 13, 14]. В такой ситуации критически важно направлять ограниченные средства на те участки, где ремонт (в том числе ППВ) даст максимальный и долговременный эффект.

Однако, как было показано выше, действующий критерий назначения ППВ (количество отступлений 2-й степени за три весенних месяца) не учитывает пространственную структуру неровностей и не позволяет отделить локальные балластные дефекты (эффективно устраняемые выправкой) от системных деформаций земляного полотна, требующих более серьезных видов ремонта. При этом европейская практика демонстрирует эффективность спектрального анализа для классификации неровностей по диапазонам длин волн, что открывает возможность для дифференцированной оценки состояния пути.

Таким образом, назрела необходимость разработки дополнительных объективных критериев, которые, с опорой на спектральный состав вертикальных неровностей, позволили бы на этапе диагностики выделять участки, где ППВ будет действительно эффективна, и тем самым

способствовать рациональному распределению ограниченных ресурсов.

Целью данного исследования является обоснование необходимости использования спектральных показателей вертикальных неровностей (энергии в диапазонах D0–D3 согласно EN 13848) в качестве дополнительных диагностических признаков при назначении планово-предупредительной выправки пути на особо грузонапряженных линиях.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Предложены спектральные показатели, характеризующие вклад коротких волн (устраняемых ППВ), а также индикаторы системных деформаций.
2. На модельных данных, имитирующих балластные дефекты и системные деформации, продемонстрирована работоспособность предложенных показателей.
3. Показаны преимущества предлагаемого подхода перед существующим в условиях дефицита финансирования.

Материалы и методы исследования

Для верификации предложенных спектральных показателей, призванных дополнить действующие критерии назначения ППВ, были использованы модельные (синтетические) данные. Такой подход позволяет на начальном этапе исследований обеспечить контролируемые условия, при которых заранее известен истинный спектральный состав

неровностей, что необходимо для проверки работоспособности методики.

Генерация данных выполнена в среде Python с использованием библиотек NumPy и Pandas. Параметры генерации соответствуют реальным условиям эксплуатации особо грузонапряженных линий:

- длина участка – 1 000 м;
- шаг дискретизации – 1 м;
- амплитуда неровностей – 40 мм;
- уровень шума – 5 % от среднеквадратичного отклонения сигнала.

Созданы два характерных сценария, отражающих различную физическую природу дефектов пути:

- сценарий А («балластные дефекты») – преобладание коротких волн в диапазонах D0 (1–3 м) и D1 (3–25 м);
- сценарий Б («системные деформации») – преобладание длинных волн в диапазонах D2 (25–70 м) и D3 (70–150 м).

Заданные доли энергии в каждом диапазоне (табл. 3) соответствуют классификации EN 13848 и обеспечивают принципиальное различие спектрального состава двух сценариев. Формирование профилей осуществлялось суперпозицией синусоид с длинами волн, равномерно распределенными внутри диапазонов, и случайными фазами.

Следует отметить, что при генерации синтетических профилей точное совпадение полученных долей энергии с целевыми значениями не гарантируется и не требуется в рамках данного исследования. Это обусловлено стохастической природой генерации: использование конечного набора гармоник со случайными фазами приводит к интерференционным эффектам, вследствие которых распределение энергии по диапазонам может отклоняться от теоретического. Кроме того, добавление шума и процедура спектрального оценивания (метод Уэлча с оконным усреднением) вносят дополнительные погрешности в оценку спектральной плотности мощности.

Однако для проверки работоспособности предложенных показателей принципиальным

является не точное соответствие долей, а сохранение качественной картины: в сценарии А действительно преобладают короткие волны (D0–D1), а в сценарии Б – длинные (D2–D3).

Измерения хордальными путеизмерительными вагонами (например, КВЛ-П) искажают истинный продольный профиль: длинные волны подавляются, короткие могут усиливаться. Для получения натуральных неровностей, пригодных для спектрального анализа, применяется процедура восстановления с использованием быстрого преобразования Фурье и обратной передаточной функции измерительной системы [7, 15, 16].

Алгоритм включает следующие этапы:

1. Вычисление дискретного преобразования Фурье от исходного сигнала $S(x)$.
2. Умножение спектра на обратную передаточную функцию $H^{-1}(\omega)$, где $H(\omega)$ – передаточная функция хордальной системы. Для вагона КВЛ-П параметры хорды при измерении вертикальных неровностей составляют: длина хорды – 17 м, положение измерительной точки – 2,7 м от одного из концов.
3. Обратное преобразование Фурье скорректированного спектра, дающее восстановленный профиль $y(x)$.

Для подавления спектральной утечки применялось окно Хэмминга. Реализация метода выполнена в авторском программном комплексе.

На основе восстановленного профиля $y(x)$ для каждого сценария рассчитывалась спектральная плотность мощности (СПМ) методом Уэлча с параметрами: длина сегмента – 1 024 точки, перекрытие – 50 %, окно – Хэмминга. СПМ представлена в размерности $\text{мм}^2 \cdot \text{м}$, что после интегрирования по длинам волн дает энергию в мм^2 .

Для расчета предложены следующие показатели.

Интегральная энергия в стандартных диапазонах (согласно EN 13848):

$$E_k = \int_{\lambda_{\min k}}^{\lambda_{\max k}} S(\lambda) d\lambda, k = D0, D1, D2, D3, (1)$$

где $S(\lambda)d\lambda$ – спектральная плотность мощности; λ – длина волны.

Таблица 3

Распределение энергии по диапазонам длин волн в модельных сценариях

Сценарий	D0	D1	D2	D3
А	0,30	0,50	0,15	0,05
Б	0,05	0,30	0,40	0,25

Энергия коротких волн – показатель, непосредственно характеризующий вклад неровностей, которые могут быть устранены ППВ (диапазоны D0 и D1):

$$E_{б.п} = E_{D0} + E_{D1}. \quad (2)$$

Индекс системной деградации – показатель, предназначенный для идентификации участков с преобладанием длинных волн (деформации земляного полотна). Знаменатель выбран как сумма энергий средних и длинных волн, чтобы индекс был чувствителен именно к росту длинноволновой составляющей относительно фонового уровня средних волн; диапазон D0 исключен, так как его вклад может быть велик при локальных дефектах и искажать оценку системных деформаций:

$$I_{сис} = \frac{E_{D2} + E_{D3}}{E_{D1} + E_{D2} + E_{D3}}. \quad (3)$$

Доминирующая длина волны – характерный масштаб неровностей, соответствующий максимуму СПМ:

$$\lambda_{дом} = \arg \max_y S(y). \quad (4)$$

Для демонстрации преимуществ предлагаемого подхода выполнено сравнение решений о назначении ППВ, принимаемых на основе действующих нормативных критериев (см. табл. 2) и на основе предложенных спектральных показателей. Принято допущение, что оба модельных участка имеют одинаковое количество отступлений 2-й степени, например 25 шт./км, что соответствует пороговому значению для грузовых путей 1-го, 2-го класса [9].

Критерием эффективности выправки в рамках исследования служит соответствие спектрального состава участка физической природе дефектов, устраняемых выправкой балласта (высокая доля энергии в диапазонах D0–D1). Участки с низким значением $E_{б.п}$ и доминирующей длиной волны более 25 м рассматриваются как требующие дополнительной диагностики (георадар, геодезическая съемка) и, возможно, направления на более высокие уровни ремонта.

Результаты исследования

Для двух сгенерированных профилей (сценарии А и Б) выполнены: восстановление натурального профиля, расчет спектральной плотности мощности и вычисление интегральных показателей по формулам (1)–(4). На рис. 2 и 3 представлены восстановленные профили и соответ-

ствующие им спектральные плотности мощности. Численные значения энергий в диапазонах D0–D3, а также производные показатели $I_{зем.пол.}$, $\lambda_{дом}$, $E_{б.п}$ сведены в табл. 4. Все энергетические величины приведены в мм², что соответствует квадрату амплитуды неровностей.

В сценарии А, моделирующем балластные дефекты, основная энергия сосредоточена в коротковолновой области: $E_{б.п} = 246,21$ мм², что составляет около 77 % от суммарной энергии (321,1 мм²). Доминирующая длина волны $\lambda_{дом} = 2,78$ м находится в диапазоне D0 (1–3 м), что характерно для локальных просадок и неровностей, порождаемых балластным слоем. Индекс системной деградации $I_{сис} = 0,68$ оказался заметным из-за наличия энергии в диапазонах D2 и D3 (в сумме 74,9 мм²), что связано со случайными флуктуациями при генерации. Тем не менее доминирующая длина волны и высокая доля коротких волн (более 75 %) однозначно идентифицируют участок как балластный.

Для сценария Б, имитирующего системные деформации земляного полотна, картина противоположная: коротковолновая энергия $E_{б.п} = 82,08$ мм² составляет лишь около 20 % от общей энергии (417,8 мм²), доминирующая длина волны 125 м (диапазон D3), индекс системной деградации близок к единице. Это соответствует преобладанию длинноволновых составляющих, характерных для деформаций основания.

На рис. 2 приведены восстановленные профили для обоих сценариев. Видно, что профиль сценария А имеет более высокочастотный характер (частые перепады), тогда как профиль сценария Б отличается плавными длинноволновыми колебаниями.

На рис. 3 показаны спектральные плотности мощности в логарифмическом масштабе, отчетливо видно смещение максимума СПМ в сторону коротких волн для сценария А и в сторону длинных для сценария Б.

Таким образом, для принятия решения о назначении ППВ следует ориентироваться в первую очередь на энергию коротких волн $E_{б.п}$ и доминирующую длину волны $\lambda_{дом}$, а $I_{сис}$ использовать как вспомогательный индикатор, подтверждающий наличие или отсутствие системных деформаций.

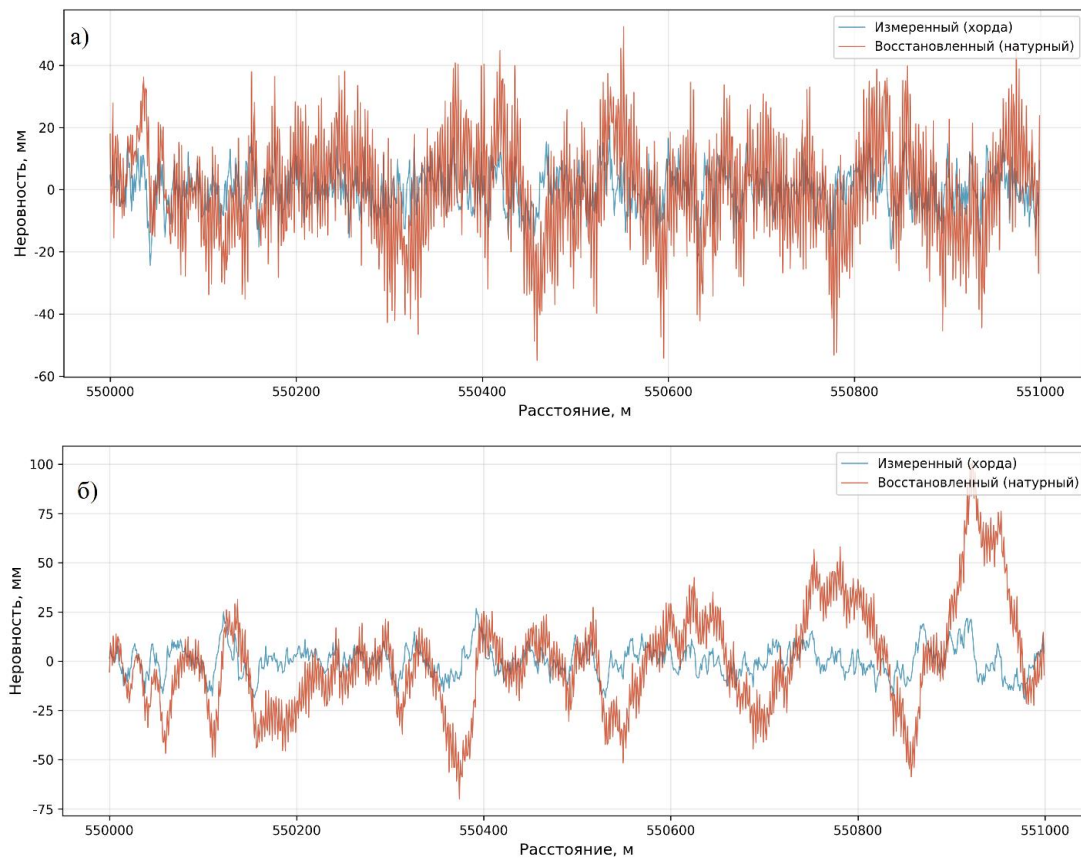


Рис. 2. Восстановленные профили вертикальных неровностей:
 а – сценарий А (балластные дефекты); б – сценарий Б (системные деформации)

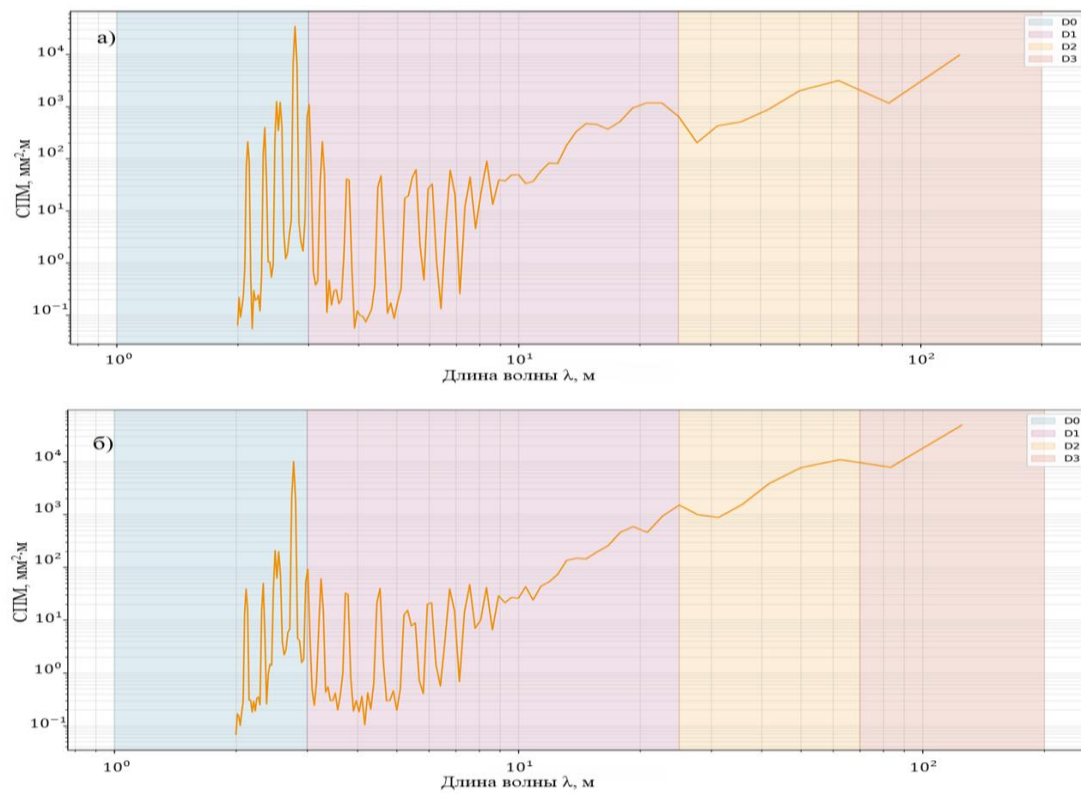


Рис. 3. Спектральная плотность мощности вертикальных неровностей:
 а – сценарий А (балластные дефекты); б – сценарий Б (системные деформации)

Таблица 4

Спектральные показатели модельных профилей

Сценарий	E_{D0} , мм ²	E_{D1} , мм ²	E_{D2} , мм ²	E_{D3} , мм ²	$E_{б.п.}$, мм ²	$I_{сис}$	$\lambda_{дом}$, м
А	210,97	35,24	31,33	43,56	246,21	0,68	2,78
Б	59,11	22,97	109,13	226,56	82,08	0,94	125

Таблица 5

Сравнение решений о назначении ППВ

Сценарий	Количество отступлений 2-й степени (условно)	Дополнительные критерии	Решение по действующим критериям	$E_{б.п.}$, мм ²	Предлагаемое решение
А	25	Условно одинаковые	Требуется ППВ	246,2	Назначить ППВ
Б	25			82,1	Осуществить дополнительную диагностику

Действующие критерии ППВ (см. табл. 2) опираются исключительно на амплитудные характеристики и количество отступлений, не учитывая спектральный состав неровностей. Для сопоставительного анализа допустим, что оба модельных участка имеют одинаковое количество отступлений 2-й степени, например 25 шт./км, что соответствует порогу для грузовых путей 1-го, 2-го класса. Тогда по действующим правилам оба участка были бы назначены в план ППВ. Однако, как показывают спектральные показатели, для сценария Б проведение ППВ будет неэффективно и недостаточно, так как причина дефектов не балласт, а земляное полотно. Результаты сравнения сведены в табл. 5.

Учет показателя $E_{б.п.}$ позволяет отбраковать участки с низкой энергией коротких волн. Если $E_{б.п.}$ ниже некоторого порога (например, менее 100 мм², что соответствует примерно 20–25 % от общей энергии), то вероятность системных деформаций высока и такой участок требует дополнительной диагностики (георадар, геодезическая съемка) и, возможно, направления на средний или капитальный ремонт. Предложенный порог может быть уточнен при обработке реальных данных.

Таким образом, использование спектральных показателей позволяет дифференцировать участки, где ППВ эффективна и необходима в первую очередь, тем самым оптимизировав затраты на ремонт и содержание пути. Это особенно актуально в условиях сокращения инвестиционных программ ОАО «РЖД».

Выводы

Выполненное исследование позволяет сделать следующие выводы. Действующие крите-

рии назначения ППВ, основанные на количестве отступлений 2-й степени за три весенних месяца, имеют реактивный характер и не учитывают пространственную структуру неровностей. Статистический анализ n км Транссибирской магистрали показал, что лишь 25,6 % отступлений фиксируется весной, тогда как основная доля (34,5 %) приходится на летний период, что ставит под сомнение обоснованность сезонной привязки.

Предложены спектральные показатели, позволяющие дифференцировать участки по физической природе дефектов: энергия коротких волн, индекс системной деградации и доминирующая длина волны. Расчетные формулы разработаны автором и ориентированы на классификацию диапазонов EN 13848.

На модельных данных, имитирующих балластные дефекты (сценарий А) и системные деформации земляного полотна (сценарий Б), продемонстрирована работоспособность предложенных показателей. Для сценария А энергия коротких волн составила 77 % от общей энергии при доминирующей длине волны 2,78 м; для сценария Б – не более 20 % при 125 м. Показатели надежно различают два типа деградации.

Использование спектральных критериев позволяет избежать неэффективного назначения ППВ на участках с системными деформациями. При условном равенстве числа отступлений традиционный подход назначает ППВ обоим участкам, тогда как спектральный анализ рекомендует для сценария Б дополнительную диагностику, способствуя рациональному распределению средств.

Полученные результаты обосновывают необходимость включения спектрального анализа вертикальных неровностей в систему дополнительных диагностических признаков при планировании ППВ. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку метода прогнозирования момента перехода деградации пути в фазу ускоренного накопления отступлений («точки бифуркации»). Для этого необходимо:

– проанализировать динамику изменения предложенных спектральных показателей во времени на основе многолетних данных путеизмерительных вагонов;

– выявить критические значения скорости роста энергии коротких волн ($\Delta E_{6,п}/\Delta T$), после которых начинается системная деградация и ППВ становится неэффективной;

– разработать алгоритм раннего предупреждения, позволяющий за 1–2 года до наступления критического состояния рекомендовать упреждающую ППВ на участках, где она еще может предотвратить переход дефектов в земляное полотно;

– провести верификацию предложенного подхода на реальных данных с известной историей ремонтов и оценкой их эффективности.

Список источников

1. Аналитический материал сектора по организации безопасности движения Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры от 30 января 2026 года. Новосибирск, 2026. 38 с.
2. Ланис А. Л., Усов Д. А., Тархов В. А. К вопросу обоснования увеличения срока эксплуатации рельсов в метрополитене // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 3 (75). С. 78–87. DOI 10.52170/1815-9265_2025_75_78.
3. О необходимости актуализации нормативов оценки геометрии рельсовой колеи / В. А. Гапанович [и др.] // Вестник Института проблем естественных монополий : Техника железных дорог. 2019. № 4. С. 22–27.
4. Влияние геометрии рельсовой колеи на характеристики движения – результаты исследований в рамках проекта ЕС DYNOTRAIN : материалы конференции SFT, Грац, 2013. Грац, 2013. 8 с.
5. Певзнер В. О., Шапетько К. В. Влияние параметров натуральных неровностей на конструкцию железнодорожного пути // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2015. Т. 8, № 8. С. 188–192.
6. Певзнер В. О., Белоцветова О. Ю., Шапетько К. В. Совершенствование нормативных документов по оценке состояния пути при скоростном движении // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2014. Т. 7, № 7. С. 14–22.
7. Малинский С. В., Шарова В. О. Перспективные методы анализа периодических неровностей пути в задачах оценки безопасности движения // Путь и путевое хозяйство. 2024. № 4. С. 9–11.
8. Об утверждении правил назначения ремонтов железнодорожного пути : распоряжение ОАО «РЖД» от 17.12.2021 № 2888/р : (ред. 03.02.2023). Доступ из справ.-правовой системы «АСПИЖТ». Режим доступа: для авторизир. пользователей.
9. Об утверждении и введении в действие инструкции по текущему содержанию железнодорожного пути : распоряжение ОАО «РЖД» от 16.11.2016 № 2288р : (ред. 02.11.2022). Доступ из справ.-правовой системы «АСПИЖТ». Режим доступа: для авторизир. пользователей.
10. Певзнер В. О. Деформативность и стабильность пути // Путь и путевое хозяйство. 2005. № 2. С. 23–26.
11. Утвержден финансовый план и инвестиционная программа ОАО «РЖД» на 2024 год // ОАО «РЖД» : [сайт]. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9351/page/2452802?id=289837> (дата обращения: 23.02.2026).
12. EN 13848-1:2019. Railway applications – Track – Track geometry quality. Part 1. Characterization of track geometry. Brussels : CEN, 2019. 32 p.
13. Совет директоров ОАО «РЖД» утвердил инвестиционную программу компании на 2025 год // ОАО «РЖД» : [сайт]. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9351/page/2452802?id=310504> (дата обращения: 23.02.2026).
14. Совет директоров ОАО «РЖД» утвердил инвестиционную программу и финансовый план на 2026 год // ОАО «РЖД» : [сайт]. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9351/page/2452802?id=320609> (дата обращения: 23.02.2026).
15. Pevzner V., Shapetko K., Slastenin A. Needed additions to the diagnostic system of high-speed lines // Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport. Cham : Springer International Publishing, 2019. P. 496–505.
16. Mauer L. Determination of track irregularities and stiffness parameters with inverse transfer functions of track recording vehicles // Interaction of Railway Vehicles with the Track and its Substructure. London : Routledge, 2018. P. 117–132.

References

1. Analytical material of the sector for the organization of traffic safety of the West Siberian Directorate of Infrastructure dated January 30, 2026. Novosibirsk; 2026. 15 p. (In Russ.).
2. Lanis A. L., Usov D. A., Tarkhov V. A. On the issue of justifying the extension of the service life of rails in the metro. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(75):78–87. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_75_78.
3. Gapanovich V. A. [et al.]. On the need to update the standards for assessing rail track geometry. *Bulletin of the Institute of Natural Monopolies Problems: Railway Equipment*. 2019;(4):22–27. (In Russ.).
4. Influence of rail track geometry on running characteristics – results of research within the EC DYNOTRAIN project. *Proceedings of the SFT Conference, Graz, 2013*. Graz; 2013. 8 p. (In Russ.).
5. Pevzner V. O., Shapetko K. V. Influence of the parameters of actual irregularities on the railway track structure. *Introduction of Modern Structures and Advanced Technologies in the Track Facilities*. 2015;8(8):188–192. (In Russ.).
6. Pevzner V. O., Belotsvetova O. Yu., Shapetko K. V. Improvement of normative documents for assessing track condition during high-speed traffic. *Introduction of Modern Structures and Advanced Technologies in the Track Facilities*. 2014;7(7):14–22. (In Russ.).
7. Malinsky S. V., Sharova V. O. Promising methods for analyzing periodic track irregularities in problems of assessing traffic safety. *Railway Track and Facilities*. 2024;(4):9–11. (In Russ.).
8. On approval of the rules for scheduling railway track repairs: Order of JSC "Russian Railways" dated December 17, 2021 No. 2888/r (as amended on February 3, 2023). Available from the legal reference system "ASPIZhT" on the local network. (In Russ.).
9. On approval and enactment of the instructions for the current maintenance of railway track: Order of JSC "Russian Railways" dated November 16, 2016 No. 2288r (as amended on November 2, 2022). Available from the legal reference system "ASPIZhT" on the local network. (In Russ.).
10. Pevzner V. O. Deformability and stability of the track. *Track and Track Facilities*. 2005;(2):23–26. (In Russ.).
11. The financial plan and investment program of JSC "Russian Railways" for 2024 were approved. *JSC "Russian Railways": [site]*. 2024. (In Russ.). URL: <https://company.rzd.ru/ru/9351/page/2452802?id=289837>.
12. EN 13848-1:2019. Railway applications – Track – Track geometry quality – Part 1: Characterization of track geometry. Brussels: CEN; 2019. 32 p.
13. The Board of Directors of JSC "Russian Railways" approved the company's investment program for 2025. *JSC "Russian Railways": [site]*. 2025. (In Russ.). URL: <https://company.rzd.ru/ru/9351/page/2452802?id=310504>.
14. The Board of Directors of JSC "Russian Railways" approved the investment program and financial plan for 2026. *JSC "Russian Railways": [site]*. 2025. (In Russ.). URL: <https://company.rzd.ru/ru/9351/page/2452802?id=320609>.
15. Pevzner V., Shapetko K., Slastenin A. Needed additions to the diagnostic system of high-speed lines. *Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport*. Cham: Springer International Publishing; 2019. P. 496–505.
16. Mauer L. Determination of track irregularities and stiffness parameters with inverse transfer functions of track recording vehicles. *Interaction of Railway Vehicles with the Track and its Substructure*. London: Routledge; 2018. P. 117–132.

Информация об авторах

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

Н. С. Вихт – аспирант Сибирского государственного университета путей сообщения, инженер сектора по организации безопасности движения Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры.

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

Information about the authors

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

N. S. Vikht – Postgraduate, Siberian Transport University; Engineer of the Traffic Safety Organization Sector, West-Siberian Directorate of Infrastructure.

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

Статья поступила в редакцию 11.03.2026; одобрена после рецензирования 31.03.2026; принята к публикации 01.04.2026.

The article was submitted 11.03.2026; approved after reviewing 31.03.2026; accepted for publication 01.04.2026.

Научная статья
УДК 625.14
doi:10.52170/1815-9265_2026_79_33

Оптимальный срок службы крестовин стрелочных переводов

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

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

¹ vdv.nsk@mail.ru ✉

² seva2233@yandex.ru

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы оценки оптимального срока службы крестовин стрелочных переводов марки 1/11.

Выполнена оценка средних долей количества стрелочных переводов самой распространенной марки 1/11, уложенных по различным типам путей на станциях, на примере четырех дистанций пути (ПЧ Т, ПЧ Б, ПЧ Кар, ПЧ Кам), расположенных на Транссибирской и Среднесибирской магистралях. Например, средняя доля стрелочных переводов по главным путям – 48 %, по приемо-отправочным – 17 %, по подъездным – 11 % и т. д.

Определены доли среднегодовой потребности в новых и старогодных крестовинах стрелочных переводов марки 1/11 при существующем нормативном сроке службы крестовин 80 млн т и увеличенном в два раза – 160 млн т. Из условия ресурсосберегающего рационального распределения старогодных крестовин стрелочных переводов рассчитаны предельные уровни годности крестовин после первого срока службы.

Установлены фактические зависимости снижения средней доли годности крестовин стрелочных переводов от увеличения их срока службы для эксплуатационных условий I и II путей Транссибирской и Среднесибирской магистралей. Определены соотношения среднего расчетного срока службы новых крестовин и оптимального коэффициента повторного использования новых крестовин после первого срока службы K_{cr} (минимальная доля годности), в том числе с учетом варьирования среднего срока службы старогодных крестовин.

По представленной методике определения оптимального (нормативного) срока службы элементов стрелочных переводов установлен расчетный срок службы новых крестовин для обеспечения рационального соотношения среднегодовой потребности в новых и старогодных крестовинах. Оптимальный расчетный срок службы крестовин стрелочных переводов марки 1/11, для соблюдения рационального уровня их годности при обеспечении оптимального соотношения полигона укладки новых и старогодных элементов стрелочных переводов, составляет 200–220 млн т.

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

Для цитирования: Величко Д. В., Севостьянов А. А. Оптимальный срок службы крестовин стрелочных переводов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 2 (79). С. 33–41. DOI 10.52170/1815-9265_2026_79_33.

Original article

Optimal service life of switch rail crossings

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

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

¹ vdv.nsk@mail.ru ✉

² seva2233@yandex.ru

Abstract. The article discusses the issues of assessing the optimal service life of 1/11 switch rail crossings.

The article evaluates the average proportions of the most common 1/11 switch type installed on different types of tracks at stations using the example of four track sections (PCh T, PCh B, PCh Kar, PCh Kam) located along the Trans-Siberian and Central Siberian railways. For example, the average share of switchings on main tracks is 48%, on receiving and sending tracks – 17%, on access tracks – 11%, etc.

The shares of the average annual demand for new and old-year crossings of switchings of the 1/11 brand, with the existing level of the standard service life of crossings in 80 million tons and the doubled service life of crossings in 160 million tons, have been determined. From the condition of resource-saving rational distribution of old-year cross-pieces of switch-gears, the limit levels of cross-pieces after the first service life are determined.

The actual dependencies of the decrease in the average share of cross-pieces of switch-gears on the increase in their service life are established, for the operational conditions of the I and II tracks of the Trans-Siberian and Central Siberian railways. The ratios of the average design life of new cross-pieces and the optimal level of the coefficient of reuse of new cross-pieces after the first service life K_s (the minimum level of the share of fitness), including taking into account the variation of the average level of the service life of old cross-pieces, have been determined.

According to the presented methodology for determining the optimal (standard) level of service life of switch elements, the levels of the estimated service life of new crossings have been determined to ensure a rational ratio of the average annual demand for new and old crossings. The optimal estimated level of service life of 1/11-type switch crossings, in order to maintain a rational level of their suitability while ensuring an optimal ratio of the area for laying new and old switch elements, is 200-220 million tons.

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

For citation: Velichko D. V., Sevostyanov A. A. Optimal service life of switch rail crossings. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(79):33–41. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_79_33.

Введение

Одной из стратегических задач развития ОАО «РЖД» является повышение срока службы железнодорожного пути до 2,5 млрд т. Для этого, в частности, необходима оценка сроков службы всех существующих элементов железнодорожного пути, в том числе крестовин стрелочных переводов (СП).

Стрелочные переводы, ввиду конструктивных и эксплуатационных особенностей [1–4], испытывают на себе повышенное динамическое воздействие от подвижного состава. СП состоят из трех основных частей (стрелки, соединительных путей и крестовины), обладающих различными прочностными параметрами, в связи с чем все три указанные части имеют различный нормативный срок службы. Например, нормативный срок службы стрелки – 275 млн т, соединительных путей – 700 млн т, крестовины – 80 млн т.

В соответствии с указаниями [5] установлены нормативные сроки службы крестовин обыкновенных СП: с литым сердечником из высокомарганцовистой стали – 80 млн т, упрочненных – 90 млн т [6].

Материалы и методы исследования

Для обоснования нормативного срока службы новых крестовин проанализируем соотношение нормативного срока службы новых и старогодных крестовин с учетом их рационального применения.

Среднее количество стрелочных переводов марки 1/11 на главных и станционных путях, на примере ПЧ Т, ПЧ Б Транссиба и ПЧ Кар, ПЧ Кам Средсиба, представлено в табл. 1.

Транссиб и Средсиб характеризуются особо грузонапряженной эксплуатационной работой и высокой скоростью движения поездов, в связи с чем вопросы оценки сроков службы крестовин СП в условиях этих ПЧ

Таблица 1

Среднее количество стрелочных переводов марки 1/11 по типам станционных путей, шт.

Тип пути станции	Количество стрелочных переводов марки 1/11 на станционных путях												Среднее	Средняя доля, %
	ПЧ Т			ПЧ Б			ПЧ Кар			ПЧ Кам				
	2750	2768	Прочие	2750	2768	Прочие	2750	2768	Прочие	2750	2768	Прочие		
I главный	28	6	0	46	8	4	28	6	0	28	14	3	171	24,5
II главный	10	20	0	22	39	0	10	20	0	25	15	3	164	23,5
Приемо-отправочный	0	15	0	0	22	1	0	0	1	3	70	4	116	16,6
Ходовой	0	0	1	0	5	5	0	0	0	3	7	7	28	4,0
Вытяжной	0	0	0	0	0	0	0	1	4	0	1	0	6	0,9
Подъездной	0	1	4	3	7	5	0	15	0	7	11	26	79	11,3
Прочий	0	1	3	4	3	2	0	1	3	5	7	16	45	6,4
Соединительный	0	9	3	0	0	0	0	9	3	1	0	0	25	3,6
Погрузочно-выгрузочный	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	2	8	12	1,7
Специальный	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	1	1	5	0,7
Деповской	0	1	3	0	0	0	0	1	3	3	21	16	48	6,9
Итого	38	53	14	76	84	20	38	53	14	76	149	84	699	100

представляют существенный интерес. Средний интервал грузонапряженности на Транссибе: по I пути – 100–103,2 млн т-км бр. / км в год; по II пути – 85,6–87,9 млн т-км бр. / км в год; на Средсибе: по I пути – 114,4–127,1 млн т-км бр. / км в год; по II пути – 41,5–48,2 млн т-км бр. / км в год.

На главных путях Транссиба и Средсиба (1, 2 классы пути) порядка 99–100 % составляют СП марки 1/11, при этом нормативными документами оговаривается использование новых материалов. На приемо-отправочных и иных станционных путях (3–5 классы пути) рационально использовать, как правило, старогодные материалы.

Для обеспечения экономически эффективного жизненного цикла крестовин стрелочных переводов необходимо определить соотношение между применением крестовин в первый период эксплуатации и в следующий за ним повторный период в качестве старогодных материалов.

При подготовке статьи использовались методы математической статистики, оптимизационные и аналитические методы исследования.

Результаты исследования

Разработана методика определения оптимального (нормативного) срока службы элементов стрелочных переводов из условия ресурсосберегающего рационального распределения старогодных крестовин стрелочных переводов:

$$V_n K_{cr} = V_3 + V_4 + V_5, \quad (1)$$

где V_n – среднегодовая потребность в новых крестовинах стрелочных переводов для укладки в пути 1 и 2 классов (материалы первого срока службы), шт./год; K_{cr} – коэффициент годности крестовин после первого срока службы; V_3, V_4, V_5 – среднегодовая потребность в старогодных крестовинах для укладки в пути 3, 4 и 5 классов соответственно, шт./год.

Коэффициент предельного уровня годности крестовин после первого срока службы

$$K_{cr} = \frac{V_3 + V_4 + V_5}{V_n}, \quad (2)$$

$$K_{cr} = \left(\frac{n_3}{T_3} + \frac{n_4}{T_4} + \frac{n_5}{T_5} \right) / \frac{n_n}{T_n}, \quad (3)$$

где n_3, n_4, n_5 – количество старогодных крестовин для укладки на путях 3, 4, 5 классов соответственно, шт.; T_3, T_4, T_5 – нормативный срок

службы крестовин стрелочных переводов на путях 3, 4, 5 классов соответственно, годы; n_n – количество новых крестовин стрелочных переводов для укладки на путях 1 и 2 классов, шт.; T_n – нормативный срок службы крестовин стрелочных переводов на путях 1 и 2 классов, годы.

Соответственно, разработанная методика может учитывать ряд эксплуатационных факторов, в том числе предельную минимальную долю годности для обеспечения потребности станционных путей в старогодных материалах, различный уровень грузонапряженности как главных, так и станционных путей, варьирование срока службы старогодных элементов.

Определим долю среднегодовой потребности в новых и старогодных материалах СП марки 1/11 при существующем нормативном сроке службы крестовин 80 млн т (табл. 2) и при увеличенном в два раза сроке (РЖД ставит такую задачу) – 160 млн т.

При этом коэффициент повторного использования новых крестовин после 1-го срока их службы равен $K_{cr} = 0,177$. То есть при нормативном сроке службы новых крестовин 60 млн т для покрытия потребности в укладке старогодных крестовин на станционные пути необходимо, чтобы доля для повторного применения составляла не менее 18 %.

Также следует понимать характер зависимости снижения доли годности крестовин для повторного применения от роста срока службы (пропущенного тоннажа этого 1-го срока службы) и, соответственно, обратную зависимость роста доли крестовин, направленных в металлолом (негодных для повторного применения). Следовательно, чем большим устанавливается нормативный уровень срока службы и из элемента конструкции выжимается максимальный ресурс, тем меньшим становится остаточный ресурс элемента конструкции.

Фактические зависимости доли годности крестовин СП от срока службы представлены для Транссибирской и Среднесибирской магистралей на рис. 1, 2 и в табл. 3.

Теоретически остаточного ресурса элемента конструкции СП может не хватить на обеспечение потребности в старогодных элементах конструкций для станционных путей, в результате чего потребуются укладывать новые дорогостоящие элементы и конструкции в малодейственные станционные пути, что является технико-экономически нерациональным

Таблица 2

**Соотношение новых и старогодных материалов марки 1/11 при существующем
нормативном сроке службы крестовин 80 млн т**

Нормативный тоннаж, млн т	Средняя грузонапряженность, млн т-км бр./км в год	Нормативный срок службы, годы		Среднее число СП, шт.	Средняя доля СП, %	Средняя годовая потребность СП, шт./год		Сумма среднего- довой потребности СП, шт./год		Доля среднегого- довой потребности СП, %/год	
		Новые СП	Старогодные СП			Новые СП	Старогодные СП	Новые СП	Старогодные СП	Новые СП	Старогодные СП
80	120	0,7	–	171	24,5	256,5	–	420,5	–	51,8	–
80	80	1,0		164	23,5	164,0				33,1	
80	30	–	2,7	116	16,6	–	43,5	–	74,5	–	8,8
80	10		8,0	28	4,0		3,5				0,7
80	10		8,0	6	0,9		0,8				0,2
80	10		8,0	79	11,3		9,9				2,0
80	10		8,0	45	6,4		5,6				1,1
80	10		8,0	25	3,6		3,1				0,6
80	10		8,0	12	1,7		1,5				0,3
80	10		8,0	5	0,7		0,6				0,1
80	10		8,0	48	6,9		6,0				1,2

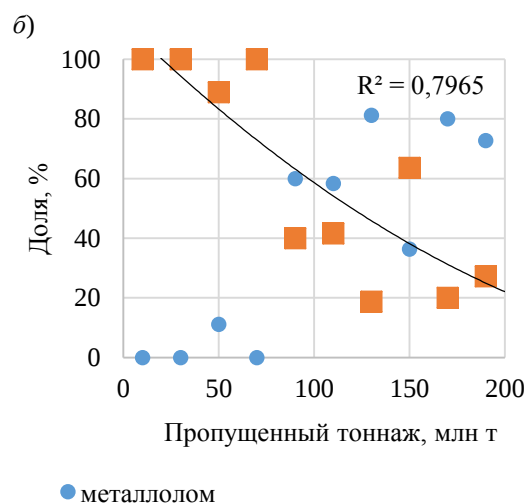
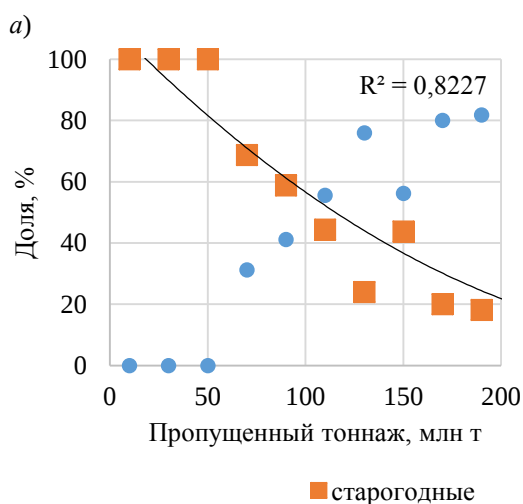


Рис. 1. Зависимость фактической доли годности крестовин СП марки 1/11 от срока службы (Транссиб):
а – I путь; б – II путь

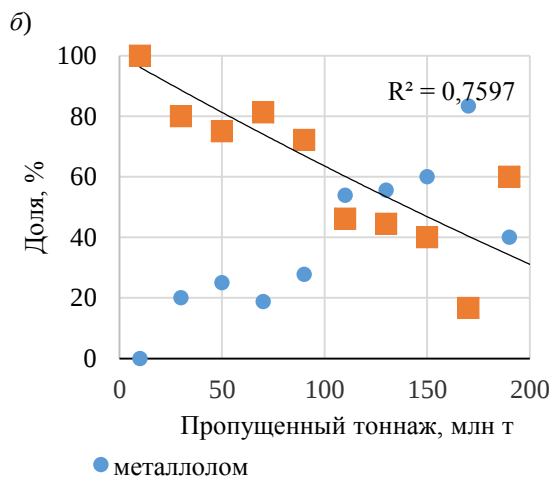
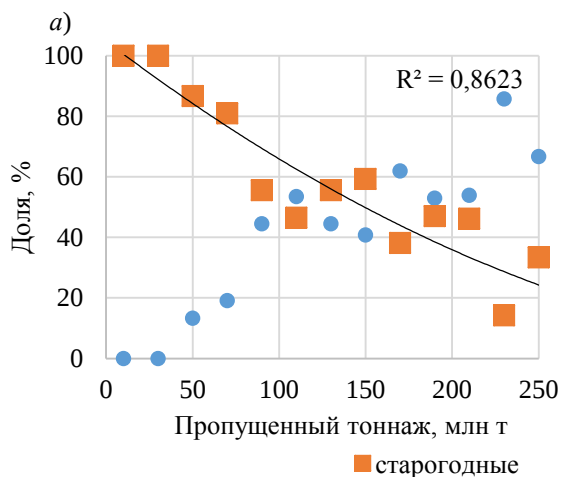


Рис. 2. Зависимость фактической доли годности крестовин СП марки 1/11 от срока службы (Средсиб):
а – I путь; б – II путь

Изменение средней доли годности крестовин от срока их службы

Срок службы, млн т	Средняя доля годности крестовин СП, %			
	Транссиб		Средсиб	
	I путь	II путь	I путь	II путь
100	52	58	50–63	61
200	20	20	25–35	20–30

для ОАО «РЖД», и нарушать нормативные сферы применения новых и старогодных элементов железнодорожного пути. Соответственно, новый повышенный нормативный срок службы крестовин СП должен определяться в том числе с учетом рационального полигона укладки новых и старогодных крестовин СП (среднегодовой потребности в укладке).

Выполняя обратные расчеты, задаваясь коэффициентом повторного использования новых материалов после первого срока их службы K_{cr} (минимальной долей годности), определим средний расчетный срок службы новых материалов, принимая, что СП для главных путей укладываются из новых материалов, а СП для станционных путей – из старогодных материалов (срок службы старогодных соответствует современным требованиям – 80 млн т).

Среднегодовая потребность в новых крестовинах составит:

$$V_n = \frac{V_3 + V_4 + V_5}{K_{cr}}. \quad (4)$$

Расчетный (нормативный) срок службы новых крестовин для обеспечения рационального соотношения среднегодовой потребности в новых и старогодных крестовинах определится следующим образом:

- в годах

$$T_n = K_{cr} n_n \left/ \left(\frac{n_3}{T_3} + \frac{n_4}{T_4} + \frac{n_5}{T_5} \right) \right., \quad (5)$$

- в миллионах тонн

$$T_n^* = K_{cr} (n_{n1} \Gamma_1 + n_{n2} \Gamma_2) \left/ \left(\frac{n_3}{T_3^* / \Gamma_3} + \frac{n_4}{T_4^* / \Gamma_4} + \frac{n_5}{T_5^* / \Gamma_5} \right) \right., \quad (6)$$

где K_{cr} – коэффициент годности крестовин для повторного использования (после первого срока службы); n_3, n_4, n_5 – количество старогодных крестовин на путях 3, 4 и 5 классов соответственно, шт.; T_n^* – нормативный срок службы крестовин стрелочных переводов на путях 1 и 2 классов, млн т; n_{n1}, n_{n2} – количество новых крестовин стрелочных переводов на

путях 1 и 2 классов, шт.; $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_5$ – грузонапряженность на путях 1–5 классов, млн т-км бр. / км в год; T_3^*, T_4^*, T_5^* – нормативный срок службы крестовин стрелочных переводов на путях 3, 4 и 5 класса, млн т.

Примеры соотношения коэффициента повторного использования новых крестовин после первого срока их службы K_{cr} и расчетного (нормативного) срока службы новых крестовин для обеспечения оптимального соотношения новых и старогодных материалов крестовин приведены в табл. 4.

Соответственно, методика позволяет, варьируя расчетным (нормативным) сроком службы новых крестовин, определять предельную минимальную долю их годности (через коэффициент повторного использования новых крестовин после первого срока службы K_{cr}) для обеспечения потребности станционных путей в старогодных крестовинах, при этом существует возможность варьирования срока службы старогодных крестовин, сферы применения новых и старогодных материалов, учета различного уровня грузонапряженности как главных, так и станционных путей, в том числе по их видам.

Определены предельные минимальные доли годности (коэффициент K_{cr}) крестовин СП путем варьирования расчетным (нормативным) сроком службы новых крестовин с учетом того, что СП для главных путей укладываются из новых материалов, а для станционных путей – из старогодных (с варьированием срока службы старогодных крестовин). Влияние варьирования срока службы старогодных крестовин на K_{cr} представлено на рис. 3.

Фактический срок службы новых крестовин на участках Транссиба и Средсиба в среднем составляет 122–150 млн т (при нормативе 80 млн т) [7–11]. Для уровней срока службы старогодных крестовин в 80 и 160 млн т на рис. 4, 5 представлены соотношения фактического уровня срока службы новых крестовин

Таблица 4

**Средний расчетный срок службы новых стрелочных переводов марки 1/11 (1, 2 классы пути)
для обеспечения оптимального соотношения новых и старогодных материалов при $K_{сг} = 0,3$**

Среднегодовая потребность СП, шт./год		Сумма среднего- довой потребно- сти СП, шт./год		Среднее число СП, шт.	Средняя доля СП, %	Нормативный срок службы, годы		Средняя грузо- напряженность, млн т-км бр. / км в год	Расчетный тоннаж, млн т	Средний расчетный тоннаж, млн т
Новые СП	Старо- годные СП	Новые СП	Старо- годные СП			Новые СП	Старо- годные СП			
149,0	–	248,3	–	171	24,5	1,1	–	120	138	135
99,3				164	23,5	1,7		80	132	
–	43,5	–	74,5	116	16,6	–	2,7	30	80	80
	3,5			28	4,0		8,0	10		
	0,8			6	0,9		8,0	10		
	9,9			79	11,3		8,0	10		
	5,6			45	6,4		8,0	10		
	3,1			25	3,6		8,0	10		
	1,5			12	1,7		8,0	10		
	0,6			5	0,7		8,0	10		
	6,0			48	6,9		8,0	10		

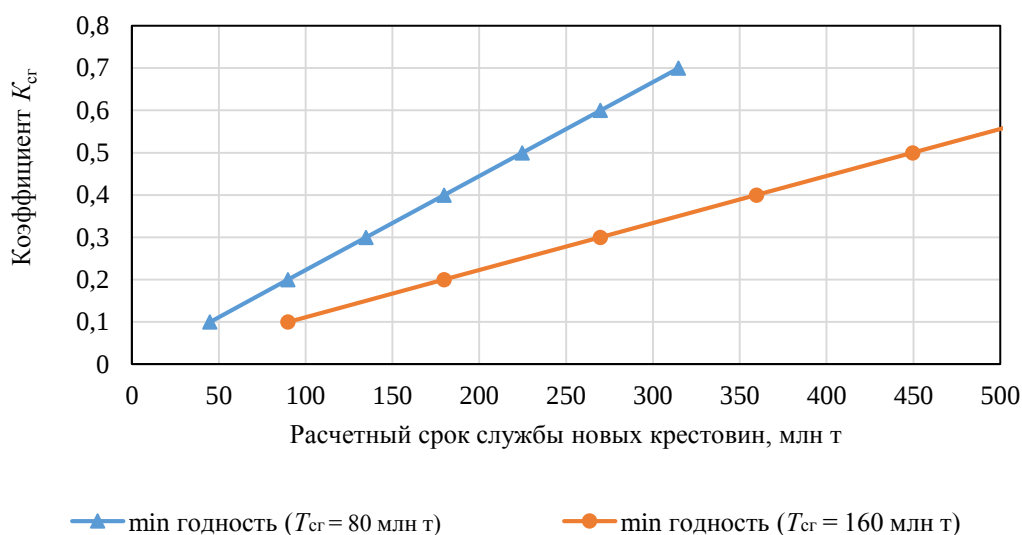


Рис. 3. Соотношение среднего расчетного (нормативного) срока службы новых крестовин и оптимального коэффициента повторного использования новых крестовин после первого срока службы $K_{сг}$ (минимальная доля годности) при сроке службы старогодных крестовин 80 и 160 млн т

на участках Транссиба и Средсиба и предельной минимальной доли их годности.

Представленные на рис. 4 и 5 соответствующие пересечения линии уровня минимальной годности с линиями уровня фактической годности графически определяют рациональный срок службы и соответствующую долю годности крестовин для условий путей Транссиба и Средсиба.

Полученные по вышеуказанной методике значения расчетного срока службы крестовин

СП для обеспечения рационального (минимального) уровня годности сведены в табл. 5.

При этом, применив представленную методику определения оптимального (нормативного) уровня срока службы элементов и конструкций СП, можно будет определить варианты нового срока службы элементов СП и использовать их для постановки технических заданий для разработки новых усиленных элементов стрелочных переводов.

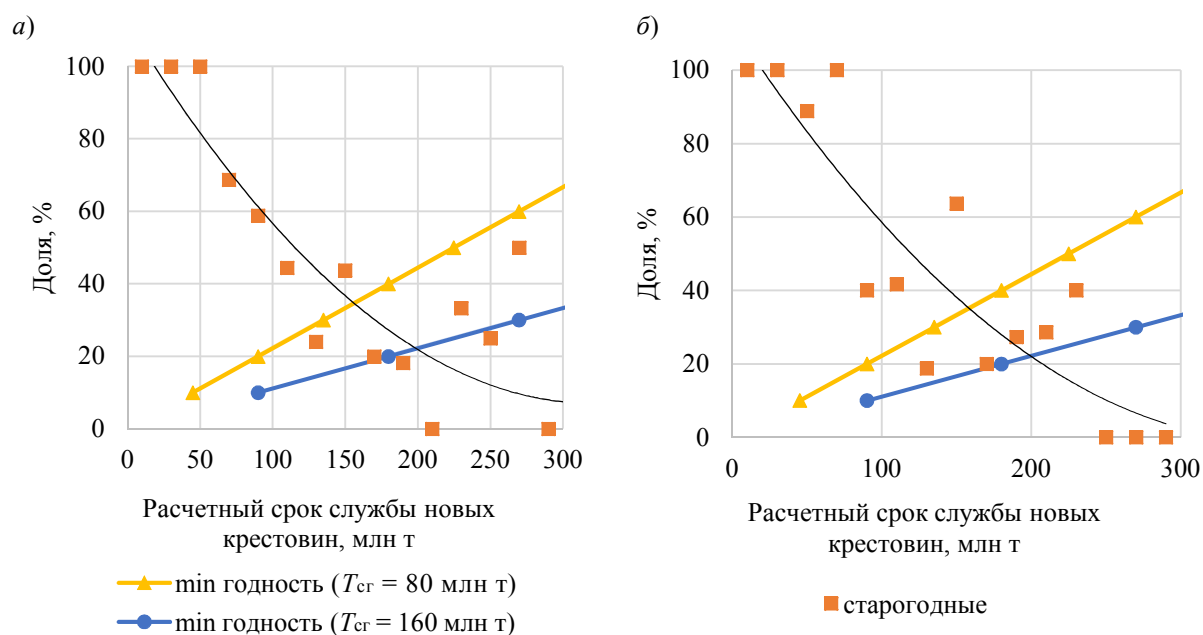


Рис. 4. Соотношение минимальной и фактической долей годности крестовин СП марки 1/11 (Транссиб):
а – I путь; б – II путь

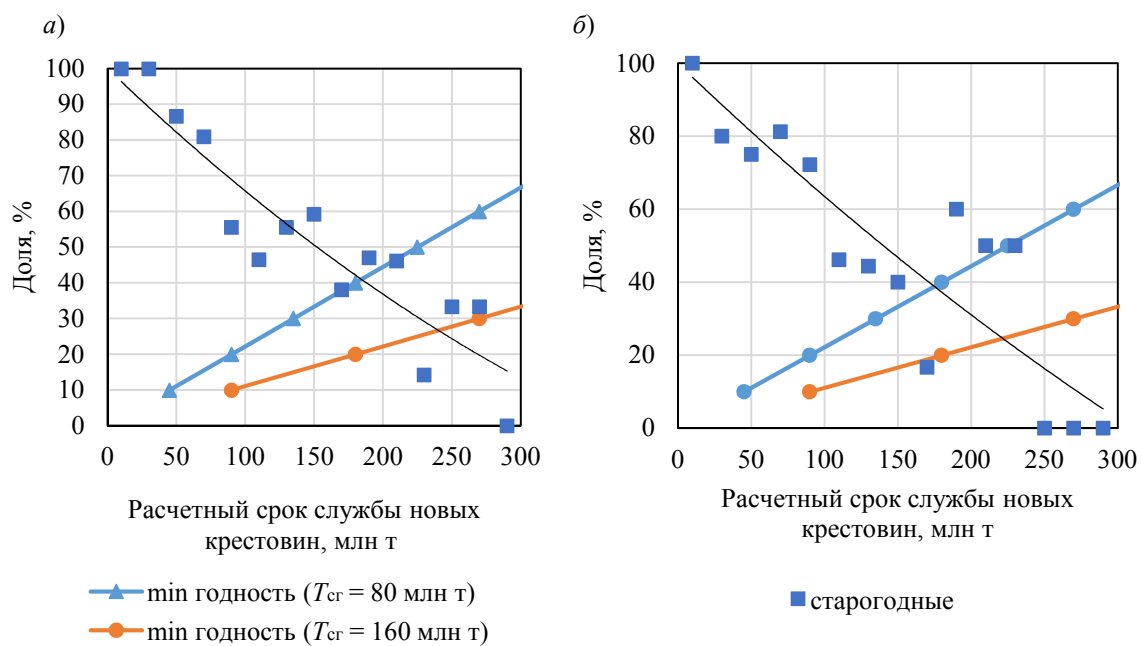


Рис. 5. Соотношение минимальной и фактической долей годности крестовин СП марки 1/11 (Средсиб):
а – I путь; б – II путь

Таблица 5

Расчетный срок службы крестовин для обеспечения рационального уровня их годности, млн т

Срок службы старогодных крестовин	Расчетный срок службы новых крестовин СП			
	Транссиб		Средсиб	
	I путь	II путь	I путь	II путь
80	155	155	185	170
160	200	200	240	220

Выводы

На основании выполненного исследования можно заключить следующее:

1. Разработана методика определения оптимального (нормативного) срока службы элементов стрелочных переводов, учитывающая ряд эксплуатационных факторов, среди которых предельная минимальная доля годности для обеспечения потребности станционных путей в старогодных материалах, различный уровень грузонапряженности как главных, так и станционных путей (в том числе по их видам), варьирование срока службы старогодных элементов, сферы применения новых и старогодных материалов, ремонтной схемы замен элементов стрелочного перевода.

2. Для новых стрелочных переводов марки 1/11, с учетом фактического срока службы крестовин существующих стрелочных переводов, превышающего действующий нормативный срок службы крестовин (80 млн т), даны рекомендации об уровне повышения срока службы новых крестовин – не менее чем до 160 млн т.

3. Оптимальный расчетный срок службы крестовин новых стрелочных переводов марки 1/11 для соблюдения рационального уровня их годности при обеспечении оптимального соотношения полигона укладки новых и старогодных крестовин стрелочных переводов составляет 200–220 млн т.

Список источников

1. Правила назначения ремонтов железнодорожного пути : распоряжение ОАО «РЖД» от 17.12.2021 № 2888р. М., 2021. 270 с.
2. 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.
3. Карпущенко Н. И., Величко Д. В. Обеспечение надежности железнодорожного пути и безопасности движения поездов : монография. Новосибирск : Издательство Сибирского государственного университета путей сообщения, 2008. 321 с.
4. 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.
5. О введении нормативных сроков службы стрелочных переводов : указание Министерства путей сообщения Российской Федерации от 19.12.2002 № С-1241у. М., 2002. 6 с.
6. ГОСТ 7370–2015. Крестовины железнодорожные. Технические условия : введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 сентября 2015 г. № 1399-ст с 1 июля 2016 г. Москва : Стандартинформ, 2015. 61 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. Карпущенко Н. И., Комардинкин Р. А. Оценка долговечности стрелочных переводов на железобетонных брусках // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2020. № 2. С. 12–20.
10. 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. С. 5–12.
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, 2024. 150 с.

References

1. Rules for designing railway track repairs. Order No. 2888r of Russian Railways dated 17.12.2021. Moscow; 2021. 270 p. (In Russ.).
2. Glyuzberg B. E., Kalachev A. M., Korolev V. V. Improving the performance of switch crossings by changing their geometry in the wheel-rail contact. *Science and Technology of Transport*. 2004;(1):70–81. (In Russ.).
3. Karpushchenko N. I., Velichko D. V. Ensuring the reliability of railway tracks and train safety. A Monograph. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Transport University; 2008. 321 p. (In Russ.).

4. Karpushchenko N. I., Komardinkin R. A. Ensuring safety during train passage through switchings on highly loaded sections. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(3):31–39. (In Russ.).
5. On the introduction of standard service life of switch gears. Instruction of the Ministry of Railways of the Russian Federation dated 19.12.2002 No. S-1241u. Moscow; 2002. 6 p. (In Russ.).
6. GOST 7370–2015. Railway crossings. Technical conditions: approved by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology No. 1399-st dated 29.09.2015, effective as of 01.07.2016. Moscow: Standartinform; 2015. 61 p. (In Russ.).
7. Karpushchenko N. I., Komardinkin R. A. Life cycle parameters of the 2750 project switch sets on reinforced concrete bars. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2020;(4):239–248. (In Russ.).
8. Soskov A. G. Operation of crossroads in heavy traffic conditions on the West Siberian Railway. *Railway Track and Facilities*. 2021;(10):2–4. (In Russ.).
9. Karpushchenko N. I., Komardinkin R. A. Assessment of durability of switch-over on reinforced concrete bars. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2020;(2):12–20. (In Russ.).
10. Velichko D. V., Sevostyanov A. A., Vorobyov V. S. Assessment of service life and failure dynamics of switch crosses on the Trans-Siberian Railway. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(1):5–12. (In Russ.).
11. Tregubchak P. V. Development of switch crosses for heavy and intensive traffic. Speciality 2.9.2 'Railway Track, Surveying, and Design of Railways'. Dissertation for the Degree of Candidate of Engineering. Tregubchak Pavel Vladimirovich; 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.

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.

Статья поступила в редакцию 04.12.2025; одобрена после рецензирования 14.04.2026; принята к публикации 23.04.2026.

The article was submitted 04.12.2025; approved after reviewing 14.04.2026; accepted for publication 23.04.2026.

Научная статья
УДК 625.143.482
doi:10.52170/1815-9265_2026_79_42

Альтернативный подход к оценке устойчивости бесстыкового пути

Павел Николаевич Смирнов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева,
Красноярск, Россия, psmirnov@list.ru

Аннотация. В статье предлагается математическая модель потери устойчивости бесстыкового пути, основанная на анализе деформированной формы эквивалентного стержня, моделирующего рельсошпальную решетку. Деформированная область эквивалентного стержня бесконечной длины разбивается на участки выпучивания с поперечными перемещениями и прилегающие участки, на которых происходит только сжатие. Длина участков неизвестна и определяется в ходе решения. Отличительной особенностью предлагаемой модели является учет разрядки сжимающих сил после потери устойчивости, а также нелинейности деформаций, но с сохранением гипотезы плоских сечений. Закон изменения сжимающей силы зависит от принятого закона изменения сопротивления среды, в которой происходит деформация. Модель улучшена учетом нелинейности сопротивлений продольным и поперечным перемещениям сечений эквивалентного стержня. Функции сопротивлений получаются аппроксимацией экспериментальных точек методом наименьших квадратов, нелинейным в случае аппроксимации поперечного сопротивления. Система нелинейных дифференциальных уравнений, которая замыкается граничными условиями и условиями трансверсальности, решается методом конечных разностей. Для составления разностных уравнений используются центральные разностные формулы, требующие минимальной длины шаблона. Решение производится методом последовательных приближений, обеспечивающим достаточное количество узлов разностной сетки. Приведены результаты расчетов параметров устойчивости рельсового пути, в том числе критическое значение температуры нагрева рельсов выше температуры закрепления, при котором может существовать устойчивая деформированная форма. Результаты решения по уточненной модели сравниваются с результатами, полученными по модели с постоянным сопротивлением и по модели без разрядки сжимающей силы. Уточнение модели путем учета нелинейностей различной природы имеет важное значение для оценки предкритического состояния бесстыкового пути.

Ключевые слова: бесстыковой путь, устойчивость гибкого стержня, нелинейное сопротивление, метод конечных разностей

Для цитирования: Смирнов П. Н. Альтернативный подход к оценке устойчивости бесстыкового пути // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 2 (79). С. 42–49. DOI 10.52170/1815-9265_2026_79_42.

Original article

An alternative approach to assessing the stability of continuous welded rail

Pavel N. Smirnov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia, psmirnov@list.ru

Abstract. The article presents a mathematical model for the loss of stability in a continuous welded rail system, based on the analysis of the deformed shape of an equivalent beam that simulates the rail-sleeper grid. The deformed area of an equivalent infinitely long beam divided into a buckling region characterized by transverse displacements and adjacent regions where only compression occurs. The length of the regions is unknown and determined during the solution. The distinctive feature of the proposed model is to take into account the release of compressive forces after loss of stability, as well as the non-linearity of deformations, but with the preservation of the Bernoulli hypothesis. The law of changing the compressive force depends on the accepted law of changing the resistance of the environment in which the deformation occurs. Model has been improved to account for the non-linearity of resistance to longitudinal and transverse cross-section displacements of the equivalent beam. Resistance functions are obtained by the approximation of experimental points using the least squares method, non-linear in case of transverse resistance approximation. The system of non-linear differential equations, which is closed by boundary conditions and transversality conditions, is solved by the finite difference method. The difference equations use central difference formulas, which require a minimum length of the template. The solution is made

by a method of successive approximations, ensuring a sufficient number of grid nodes. The results of track stability parameters calculations are presented. Including the critical value of the heating temperature of the rails above the fixing temperature, at which a stable deformed shape can exist. The results of the solution according to the refined model are compared with the results of the model with constant resistance and with the results of the model without the release of the compressive force. Refinement of the model by taking into account non-linearities of various natures is important for assessing the pre-critical state of a continuous welded track.

Keywords: continuous welded rail, stability of flexible beam, non-linear resistance, finite difference method

For citation: Smirnov P. N. An alternative approach to assessing the stability of continuous welded rail. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(79):42–49. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_79_42.

Введение

Географическое положение нашей страны располагает к интенсивному развитию железнодорожного транспорта. Одним из направлений такого развития является расширение использования бесстыкового пути. При этом применение длинномерных рельсовых плетей в регионах с жесткими климатическими условиями приводит к возникновению проблем, связанных с изменением температуры. Возникают две задачи о компенсации температурных деформаций: задача о разрыве рельсов при понижении температуры относительно температуры закрепления и задача о потере устойчивости рельсовых плетей при повышении температуры относительно температуры закрепления. Решению этих задач посвящено множество работ. Современные исследования отечественных авторов [1; 2, с. 44] предлагают решения, учитывающие воздействие поездов и различных накопленных эффектов. Все они либо основываются на энергетических методах, предполагающих аппроксимацию функций перемещения эквивалентного стержня, который моделирует рельсошпальную решетку, либо в той или иной форме используют точные решения, полученные А. Я. Коганом и приведенные в [3, с. 146]. В данной работе предлагается рассмотреть решение задачи устойчивости бесстыкового пути, основанное на анализе деформированной формы эквивалентного стержня и предложенное А. Кэрром [4]. Данное решение учитывает нелинейность деформаций и разрядку сжимающей силы, происходящую при выбросе пути. Однако оно имеет некоторые особенности, связанные с моделированием и сложностью получения аналитических решений дифференциальных уравнений. Объединение преимуществ подходов, изложенных в [3, 4] позволит получить уточненную модель потери устойчивости бесстыкового пути, пригодную к анализу его предкритического состояния. В данной работе рассматривается статическая задача потери устойчивости рельсового пути, в которой нагрузками явля-

ются только продольные сжимающие температурные силы. Воздействие подвижного состава на путь, проявляющееся в динамической компоненте нагрузки и в изменении сопротивления гибкого стержня перемещениям, не учитывается, что приводит к получению заниженных значений критической температуры. Современные исследования устойчивости пути зарубежных авторов преимущественно представляют собой параметрический анализ конечно-элементных моделей рельсошпальной решетки разной степени детализации [5, с. 172; 6, с. 822] при помощи прикладных CAE-программ.

Материалы и методы исследования

В случае возникновения выброса пути наблюдается локальная потеря устойчивости рельсошпальной решетки, которая представляет собой раму на вязкоупругом основании. Сопротивление между элементами рамы обеспечивается силами трения, т. е. соединения проявляют существенную нелинейность. Все это приводит к значительным трудностям при точном моделировании и подавляющее большинство исследователей вместо рамы используют в качестве модели эквивалентный стержень с соответствующими геометрическими характеристиками поперечного сечения. Замена рамы эквивалентным стержнем исключает из модели взаимное перемещение рельсов и шпал и, соответственно, силы сопротивления в их соединениях. Такое упрощение не позволяет рассматривать локальные деформации в соединениях рельсошпальной решетки и предварительное напряжение вследствие угона пути, но дает возможность построить первое приближение расчетной модели потери устойчивости бесстыкового пути. В настоящей работе рассматривается только первая мода потери устойчивости гибкого эквивалентного стержня. При моделировании выброса используется стержень бесконечной длины, так как длина рельсовых плетей многократно превышает длину деформированной области. Деформированная область разбивается на три

участка: участок выпучивания длиной $2L$, на котором наблюдаются поперечные перемещения сечений стержня, и прилегающие участки длиной A , на которых происходит только сжатие (рис. 1). Длины участков заранее неизвестны и подлежат определению в ходе решения.

При потере устойчивости эквивалентного стержня происходит разрядка сжимающих сил: величина сжимающей силы на деформированном участке принимает значение, которое меньше обычной температурной сжимающей силы $N_t = EF\alpha T$. Здесь E – модуль упругости рельсовой стали; F – площадь поперечного сечения эквивалентного стержня; α – коэффициент линейного температурного расширения; T – температура нагрева свыше температуры закрепления рельсов. Величина наименьшей сжимающей силы $\bar{N}_t$ на участке выпучивания принимается в качестве параметра, перебором которого конструируется решение. Сопротивление перемещению рельсошпальной решетки зависит от множества факторов, к которым относится влияние окружающей среды и условий эксплуатации. Большое количество работ отечественных и зарубежных авторов [7, с. 2; 8, с. 5; 9, с. 2] посвящено плани-

рованию и проведению экспериментов по определению таких сопротивлений. В модели потери устойчивости гибкого стержня удобно использовать функции сопротивления, получаемые некоторой аппроксимацией экспериментальных точек. Для дальнейшей аппроксимации возьмем зависимости для продольного и поперечного сопротивлений, приведенные в работах [4; 9, с. 5]. Графики этих сопротивлений, построенные по усредненным экспериментальным данным, показаны на рис. 2.

Оба графика имеют асимптоты и не проходят через ноль, что не позволяет в общем случае аппроксимировать экспериментальные точки функциями, линейными относительно коэффициентов. Но если принять во внимание, что наибольшее продольное перемещение $u_{\max}$ в приближенном решении [4, с. 24] не превышает 6 мм, то можно построить аппроксимирующую функцию для продольного сопротивления без учета области за пределами графика, приведенного на рис. 2.

Аппроксимация обеих функций сопротивления проводится методом наименьших квадратов. В случае продольного сопротивления в качестве аппроксимирующей функции примем функцию, линейную относительно коэффициентов:

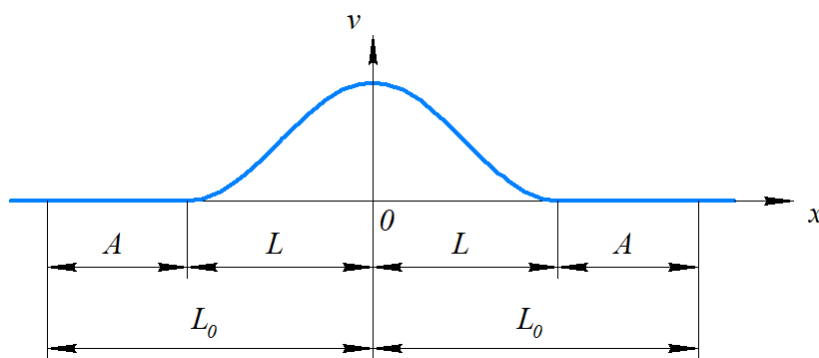


Рис. 1. Деформированная форма эквивалентного стержня

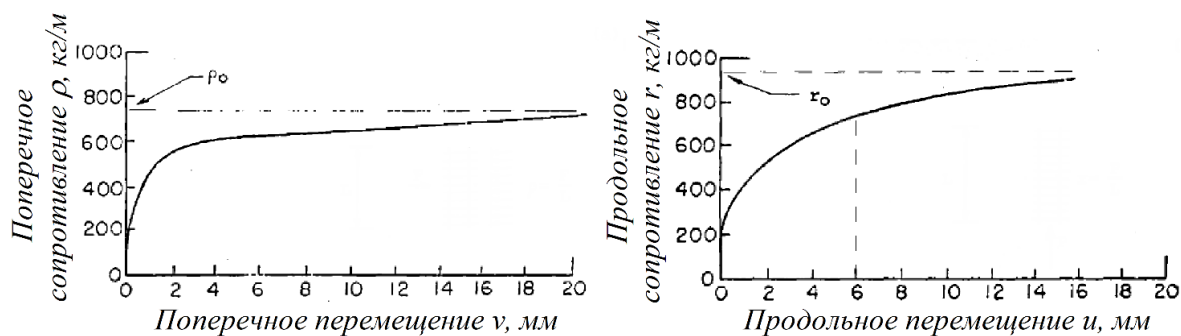


Рис. 2. Зависимость сопротивлений грунта от перемещений гибкого стержня

$$r(u, A, B) = Au^{1/p} + B, \quad (1)$$

где u – продольное перемещение стержня; A и B – коэффициенты; p – номер итерации численного решения.

В соответствии с методом наименьших квадратов нужно найти минимум функции ошибки. Условие минимума функции приводит к системе уравнений, линейных относительно коэффициентов функции r . Последовательное решение этой системы с различными значениями p приводит к следующей функции продольного сопротивления:

$$r(u) = 2,8767\sqrt[3]{u} + 1,7723. \quad (2)$$

Наибольшие поперечные перемещения принимают значения более 200 мм, и при аппроксимации экспериментальных точек некоторой функцией необходимо учитывать наличие асимптоты в зависимости сопротивления от перемещений. В работе [3, с. 146] предлагается использовать функцию арктангенса для аппроксимации функции поперечного сопротивления. Недостаток такого приближения заключается в том, что арктангенс проходит через точку (0; 0), в то время как начальное сопротивление поперечным перемещениям отличается от нуля. Примем следующий вид аппроксимирующей функции:

$$\rho(v, A, B, C) = Ae^{\frac{B}{v+C}}, \quad (3)$$

где v – поперечное перемещение стержня; A , B и C – коэффициенты.

Условие минимума функции ошибки аппроксимации приводит к системе трех уравнений, нелинейных относительно коэффициентов A , B и C . Решение для этих коэффициентов будем искать при помощи итерационной процедуры, основанной на неявном демпфированном методе Ньютона – Рафсона. Примем начальное приближение ($A_0 = 7,1$; $B_0 = 0,023686$; $C_0 = 0,01$) и коэффициент демпфирования $\lambda = 0,5$. Получаем следующее решение для аппроксимирующей функции поперечного сопротивления:

$$\rho(v) = 6,8174e^{\frac{0,5473}{v+0,2397}}. \quad (4)$$

В дальнейшем решении используются функции сопротивлений (2) и (4), но их вид на ход решения не влияет, и аппроксимация может быть проведена любым способом. Или может вообще не проводиться, и при решении используется табличная форма функций сопротивления.

Анализ работы внешних сил, затраченной на деформацию гибкого стержня, приводит к

системе дифференциальных уравнений, подробный вывод которых приведен в [10, с. 569]. Эта система, описывающая деформированную форму эквивалентного стержня на участке локальной потери устойчивости, с учетом приведенных выше рассуждений имеет вид

$$\begin{cases} (EJv_L'')'' - (EF(\varepsilon_L - \alpha T)v_L')' = -\rho(v_L); \\ (EF(\varepsilon_L - \alpha T))' = -r(u_L); \\ (EF(\varepsilon_A - \alpha T))' = -r(u_A), \end{cases} \quad (5)$$

где J – осевой момент инерции поперечного сечения эквивалентного стержня; v_n – поперечные перемещения на соответствующем участке ($v_A \equiv 0$); u_n – продольные перемещения на соответствующем участке; $\varepsilon_n = u_n' + \frac{1}{2}(v_n')^2$,

$n = \overline{A, L}$ – нелинейные деформации на соответствующем участке.

Деформация ε_L относится к участку выпучивания, деформация ε_A – к прилегающему участку без поперечных перемещений. Все операции дифференцирования производятся по переменной x . Первое уравнение системы (5) совпадает по форме с уравнением устойчивости бесстыкового пути в [3, с. 147], если учесть, что интеграл второго уравнения есть величина сжимающей силы, принимаемая автором постоянной.

Для дифференцирования произведения в первом уравнении запишем интеграл второго уравнения в виде

$$EF(\varepsilon_L - \alpha T) = -\bar{N}_t - \int_0^x r(u_L) dx, \quad (6)$$

где $\bar{N}_t$ – наименьшее значение сжимающей силы на участке выпучивания.

Раскроем скобки в системе (5), приведем уравнения к каноническому виду и перепишем относительно продольных и поперечных перемещений:

$$\begin{cases} \bar{N}_t + \int_0^x r(u_L) dx \\ v_L'''' + \frac{0}{EJ} v_L'' + r(u_L) v_L' = -\frac{\rho(v_L)}{EJ}; \\ u_L'' + v_L' v_L'' = -\frac{r(u_L)}{EF}; \\ u_A'' = -\frac{r(u_A)}{EF}. \end{cases} \quad (7)$$

Решать систему уравнений будем при помощи универсального численного метода реше-

ния подобных задач – метода конечных разностей. Наивысший порядок производной в первом уравнении – четвертый. Для аппроксимации этой производной центральной конечно-разностной формулой требуется пять точек, соответственно, выбираем для первого уравнения пятиточечный шаблон. Нанесем на участке L равномерную сетку с количеством узлов n . Заменяя в первом уравнении системы (7) производные на их разностные аналоги и группируя множители при узлах, получаем следующую конечно-разностную схему первого уравнения:

$$\begin{aligned} & (v_L)_{j+2} + C_1(v_L)_{j+1} + C_2(v_L)_j + C_3(v_L)_{j-1} + \\ & + (v_L)_{j-2} = -\frac{h^4 \rho_j(v_L)}{EJ}, \quad (8) \\ \text{где } C_1 = & \frac{h^2 \left(\bar{N}_t + \int_0^{x_j} r(u_L) dx \right)}{EJ} + \frac{h^3 r_j(u_L)}{2EJ} - 4, \\ C_2 = & 6 - \frac{2h^2 \left(\bar{N}_t + \int_0^{x_j} r(u_L) dx \right)}{EJ}, \\ C_3 = & \frac{h^2 \left(\bar{N}_t + \int_0^{x_j} r(u_L) dx \right)}{EJ} - \frac{h^3 r_j(u_L)}{2EJ} - 4, \end{aligned}$$

$h = L / (n - 1)$ – шаг сетки на участке выпучивания.

Интегралы в приведенных формулах берутся на соответствующих шагах итерационной процедуры численным методом по правилу трапеций. Записывая такие уравнения для всех узлов сетки, получаем систему из n уравнений с $n + 4$ неизвестными перемещениями в узлах. Граничные перемещения для функции поперечных перемещений на участке L , с учетом симметрии задачи и первой моды потери устойчивости, имеют вид:

$$\begin{aligned} v_L'(0) = 0; \quad v_L'''(0) = 0; \quad v_L(L) = 0; \\ v_L'(L) = 0; \quad v_L''(L) = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Оставшиеся два уравнения системы (7), описывающие продольные перемещения сечений стержня на разных участках, включают производные не выше второго порядка. Для их аппроксимации центральными конечно-разностными формулами достаточно трехточечного шаблона. Рассмотрим указанные уравнения относительно только продольных перемещений u , заменим производные на их разностные аналоги и сгруппируем множители при узлах. Получаем следующую конечно-разностную схему:

$$\begin{cases} (u_L)_{j+1} - 2(u_L)_j + (u_L)_{j-1} = -(v_L')_j (v_L'')_j h_1^2 - \frac{h_1^2 r_j(u_L)}{EF}; \\ (u_A)_{j+1} - 2(u_A)_j + (u_A)_{j-1} = -\frac{h_2^2 r_j(u_A)}{EF}, \end{cases} \quad (10)$$

где $h_1 = h$ – шаг сетки на участке выпучивания; $h_2 = A / (n - 1)$ – шаг сетки на прилегающем участке.

Граничные условия для функции продольных перемещений складываются из условий на концах стержня и условий сопряжения участков:

$$\begin{aligned} u_L(0) = 0; \quad u_A(L_0) = 0; \quad u_L(L) = u_A(L); \\ u_L'(L) = u_A'(L); \quad u_A'(L_0) = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Анализ матрицы коэффициентов общей системы уравнений показывает, что она имеет блочный вид и уравнения относительно поперечных и продольных перемещений могут быть решены независимо. Для поиска решений поперечных перемещений используются уравнения (8) совместно с граничными условиями (9). Продольные перемещения получаем решением уравнений (10) совместно с граничными условиями (11). Решение производится методом последовательных приближений, позволяющим определить достаточное количество узлов разностной сетки и подобрать с достаточной точностью значения переменных сопротивлений в узлах.

Результаты исследования

Расчет выполнен в системе компьютерной алгебры с использованием параметров эквивалентного стержня из работы [4, с. 26]. В таблице приведены результаты расчетов по следующим моделям: расчет 1 – решение без учета разрядки сжимающей силы на деформированном участке; расчет 2 – решение из [4, с. 21], не учитывающее продольных сопротивлений на участке выпучивания; расчет 3 – оригинальное решение с учетом переменных сопротивлений на всех участках.

Для расчетов 2 и 3 указано наименьшее значение температуры нагрева, при котором может возникать устойчивая деформированная форма эквивалентного стержня. В модели расчета 1 отсутствует экстремум функции температуры, поэтому в качестве расчетного значения принята критическая температура из расчета 3. На рис. 3 представлены графики зависимостей сжимающей силы на участке выпучивания $\bar{N}_t$ и температуры нагрева T от наибольших поперечных

перемещений $v_{\max}$. Графики продольных и поперечных перемещений сечений эквивалентного стержня представлены на рис. 4.

Сплошной синей линией показаны результаты расчета 1, пунктирной красной линией –

расчета 2 и штрихпунктирной черной линией – расчета 3. В модели без разрядки сжимающих сил длина A прилегающего участка оказывается бесконечно большой. А перемещения на этом участке постоянны и не равны нулю, что

Результаты расчета параметров деформированной формы

Номер расчета	Температура нагрева T , °C	Сжимающая сила $\bar{N}_t$, кН	Длина участка L , м	Длина участка A , м	Наибольшие поперечные перемещения v , мм	Наибольшие продольные перемещения u , мм
1	42,79	1342,1	5,28	∞	95,0	1,2
2	43,68	909,9	6,40	48,6	206,6	3,8
3	42,79	909,9	6,42	92,6	231,3	5,0

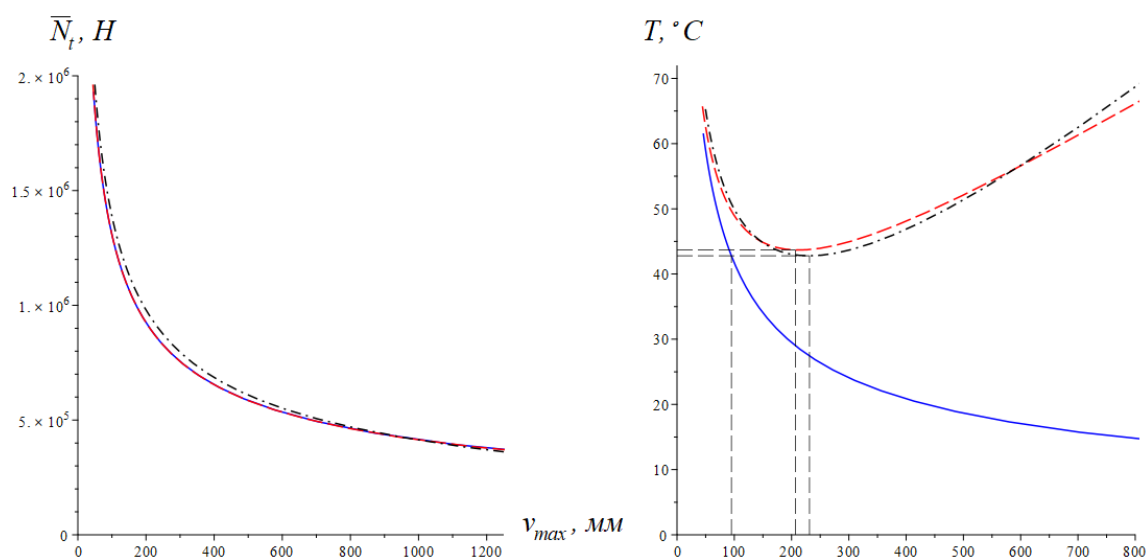


Рис. 3. Зависимость сжимающей силы $\bar{N}_t$ и температуры нагрева T от наибольших поперечных перемещений $v_{\max}$

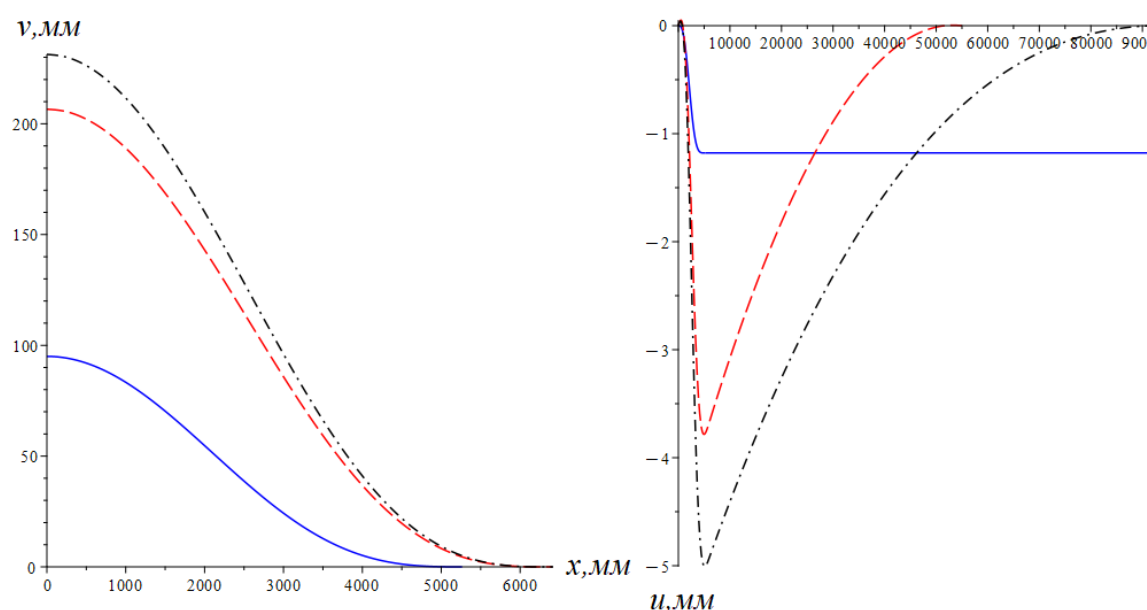


Рис. 4. Функции поперечных перемещений v и продольных перемещений u

противоречит условиям ограниченного температурного расширения и предполагает отсутствие сопротивления продольным перемещениям.

Значение поперечных перемещений в расчете 1 значительно меньше значений в остальных расчетах и совпадает с результатами расчета деформаций стержня в упругой среде классическим методом С. П. Тимошенко.

Выводы

В работе представлена альтернативная математическая модель для оценки устойчивости бесстыкового пути в случае моделирования рельсошпальной решетки эквивалентным стержнем. Учтена разрядка сжимающих сил после деформации, которая оказывает значительное влияние на параметры деформированной формы. Исходная математическая модель дополнена учетом нелинейной зависимости сопротивлений продольному и поперечному перемещениям рельсошпальной решетки от величины этих перемещений. Для определения итоговых значений компонент векторов перемещений используется метод последовательных приближений, критерий останова алгоритма основан на оценке близости двух соседних решений.

Анализируя результаты расчетов, можно сделать вывод, что математические модели без учета разрядки сжимающих сил плохо подходят для оценки параметров потери устойчивости эквивалентных стержней. В этом случае зависимость температуры и наибольших поперечных перемещений имеет монотонный характер, причем меньшим значениям температуры соответствуют большие перемещения. Функции продольных и поперечных перемещений, полученные в результате расчета по такой модели, значительно отличаются от результатов с учетом разрядки. Поперечные перемещения получаются существенно меньшими, продольные перемещения нигде не обращаются в ноль, кроме центра деформированной формы.

Учет нелинейного характера сопротивлений не оказывает значительного влияния на величину критической температуры, после которой возможно существование равновесной деформированной формы. Но влияет на величину перемещений при потере устойчивости, а также немного меняет форму зависимости температуры и перемещений. В целом учет нелинейностей различной природы при моделировании может быть использован для уточнения методик определения предкритических состояний бесстыкового пути.

Список источников

1. Расчет устойчивости бесстыкового пути в кривых энергетическим методом с учетом воздействия поездов / В. В. Карпачевский, В. В. Шубитидзе, Е. В. Корниенко [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2022. № 2 (86). С. 75–80. DOI 10.46973/0201-727X_2022_2_75.
2. Ардышев И. К. Продольные деформации рельсовых плетей при рекуперативном торможении поездов в суровых климатических условиях // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 2 (69). С. 41–48. DOI 10.52170/1815-9265_2024_69_41.
3. Коган А. Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом. Москва : Транспорт, 1997. 326 с.
4. Kerr A. D. Analysis of thermal track buckling in the lateral plane // Acta Mechanica. 1978. Vol. 30. P. 17–50. <https://doi.org/10.1007/BF01177436>.
5. Parametric study on stability of continuous welded rail track. Ballast resistance and track irregularity / N.-H. Lim, S.-Y. Han, T.-H. Han, Y.-J. Kang // International Journal of Steel Structures. 2008. Vol. 8. P. 171–181.
6. Kalliainen A., Kolisoja P., Nurmikolu A. 3D finite element model as a tool for analyzing the structural behavior of a railway track // Procedia Engineering. 2016. Vol. 143. P. 820–827. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.1>.
7. Discrete element method analysis of lateral resistance of different sleepers under different support conditions / P. Mansouri, J.-A. Zakeri, M. Esmaeili, S. Ghahremani // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 327. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126915>.
8. Xu C., Hayano K., Nakamura T. Dynamic evaluation method for assessing lateral stability of ballasted railway tracks with defects // Construction and Building Materials. 2025. Vol. 484. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141570>.
9. Investigating the effect of railway track ballast and bed conditions on lateral resistance of timber, concrete, steel and composite sleepers using a novel test methodology / J. W. Whittle, I. A. Slodczyk, S. Danks [et al.] // Engineering Structures. 2025. Vol. 340. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.120769>.

10. Kerr A. D., El-Aini Y. M. Determination of admissible temperature increase to prevent vertical track buckling // *Journal of Applied Mechanics*. 1978. Vol. 3 (45). P. 565–573. <https://doi.org/10.1115/1.3424362>.

References

1. Karpachevskiy V. V., Shubitidze V. V., Korniyenko E. V. [et al.]. Calculation of the stability of jointless track in curves by the energy method due to the impact of trains. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya*. 2022;(86):75–80. (In Russ.). DOI 10.46973/0201-727X_2022_2_75.
2. Ardyshev I. K. Longitudinal deformations of continuously welded rail track under recuperative braking of trains in inclement climatic conditions. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(69):41–48. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_69_41.
3. Kogan A. Ya. Track dynamics and its interaction with rolling stock. Moscow: Transport; 1997. 326 p. (In Russ.).
4. Kerr A. D. Analysis of thermal track buckling in the lateral plane. *Acta Mechanica*. 1978;30:17–50. <https://doi.org/10.1007/BF01177436>.
5. Lim N.-H., Han S.-Y., Han T.-H. [et al.]. Parametric study on stability of continuous welded rail track. Ballast resistance and track irregularity. *International Journal of Steel Structures*. 2008;8:171–181.
6. Kalliainen A., Kolisoja P., Nurmikolu A. 3D finite element model as a tool for analyzing the structural behavior of a railway track. *Procedia Engineering*. 2016;143:820–827. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.1>.
7. Mansouri P., Zakeri J.-A., Esmaili M. [et al.]. Discrete element method analysis of lateral resistance of different sleepers under different support conditions. *Construction and Building Materials*. 2022;327. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126915>.
8. Xu C., Hayano K., Nakamura T. Dynamic evaluation method for assessing lateral stability of ballasted railway tracks with defects. *Construction and Building Materials*. 2025;484. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141570>.
9. Whittle J. W., Slodczyk I. A., Danks S. [et al.]. Investigating the effect of railway track ballast and bed conditions on lateral resistance of timber, concrete, steel and composite sleepers using a novel test methodology. *Engineering Structures*. 2025;340. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.120769>.
10. Kerr A. D., El-Aini Y. M. Determination of admissible temperature increase to prevent vertical track buckling. *Journal of Applied Mechanics*. 1978;3(45):565–573. <https://doi.org/10.1115/1.3424362>.

Информация об авторе

П. Н. Смирнов – старший преподаватель кафедры «Техническая механика» Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева.

Information about the author

P. N. Smirnov – Senior Lecturer of the Technical Mechanics Department, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology.

Статья поступила в редакцию 30.01.2026; одобрена после рецензирования 22.04.2026; принята к публикации 30.04.2026.

The article was submitted 30.01.2026; approved after reviewing 22.04.2026; accepted for publication 30.04.2026.

Научная статья
УДК 625.1+656.222
doi:10.52170/1815-9265_2026_79_50

Особенности выбора способа освоения перевозок железнодорожным транспортом с учетом закономерностей развития эксплуатационной работы и транспортной сети

Алексей Васильевич Дмитренко^{1✉}, Александра Дмитриевна Калидова²,
Антон Андреевич Гунбин³

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

¹ dmitrenkoav@mail.ru✉

² alexsandra_kd@bk.ru

³ gunbin_gdsu@mail.ru

Аннотация. Развитие сети железных дорог России и совершенствование эксплуатационной работы тесно связаны с освоением возрастающих объемов перевозок. На первом этапе развития транспорта увеличение объемов перевозок осуществлялось в основном за счет строительства новых железнодорожных линий; на следующем этапе, после насыщения наиболее развитых территорий России, – за счет повышения среднего веса грузовых поездов. При этом основные технические средства по формированию и расформированию грузовых поездов, переработке вагонов внедрялись в крупных городах, что приводило к значительным затратам. На современном этапе развития железнодорожного транспорта следует оценить эффективность третьего способа – развития существующих магистральных линий за счет укладки дополнительных главных путей. Речь идет о двухпутных вставках на однопутных линиях и в отдельных случаях об укладке третьих главных путей на двухпутных магистралях.

В статье предлагается метод оценки условий работы однопутных перегонов железнодорожных линий с применением имитационного моделирования в программе «Барьер-2», основанный на определении задержек пропуска поездопотоков, в том числе из-за скрещения поездов. Выполнены варианты расчетов задержек для непакетного и пакетного графика движения при различных перегонных временах хода и межпоездных интервалах. Полученные результаты обосновывают способ учета задержек поездов на однопутных перегонах, который может использоваться для технико-экономической оценки укладки дополнительных главных путей при развитии существующих участков железных дорог.

Ключевые слова: развитие сети железных дорог, вес поезда, однопутные линии, задержки поездопотока, моделирование

Для цитирования: Дмитренко А. В., Калидова А. Д., Гунбин А. А. Особенности выбора способа освоения перевозок железнодорожным транспортом с учетом закономерностей развития эксплуатационной работы и транспортной сети // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 2 (79). С. 50–59. DOI 10.52170/1815-9265_2026_79_50.

Original article

Peculiarities of choosing a method for developing rail transportation, taking into account the development patterns of operational work and the transport network

Alexey V. Dmitrenko^{1✉}, Alexandra D. Kalidova², Anton A. Gunbin³

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

¹ dmitrenkoav@mail.ru✉

² alexsandra_kd@bk.ru

³ gunbin_gdsu@mail.ru

Abstract. The development of the Russian railway network and the improvement of transportation technology are closely related to the development of increasing transportation volumes by rail. In the first stage of transport development, the increase in transportation volumes was mainly achieved through the construction of new railway lines; in the next stage, after the saturation of Russia's most developed territories, it was achieved through increasing the average weight of freight trains. At the same time, the main technical means for the formation and disbanding of freight trains, and the processing of cars were carried out in large cities, which led to significant costs. At the

current stage of rail transport development, it is necessary to evaluate the effectiveness of the third method – the development of existing main lines by laying additional main tracks. This involves double-track inserts on single-track lines and, in some cases, the laying of third main tracks on double-track main lines.

The article proposes a method for assessing the operating conditions of single-track sections of railway lines based on simulation modeling using the 'Barrier-2' program, based on determining delays in the passage of train flows, including those caused by train crossings. Delay calculations for non-packet and packet schedules with various inter-line travel times and train intervals were performed. The results substantiate a method for accounting for train delays on single-track sections, which can be used for the feasibility study of laying additional main tracks during the development of existing railway sections.

Keywords: railway network development, train weight, single-track lines, train flow delays, modeling

For citation: Dmitrenko A. V., Kalidova A. D., Gunbin A. A. Peculiarities of choosing a method for developing rail transportation, taking into account the development patterns of operational work and the transport network. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(79):50–59. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_79_50.

Введение

Железнодорожный транспорт после своего появления быстро занял важнейшее место в транспортной системе многих стран. За счет низких эксплуатационных расходов и относительно высокой провозной способности объем перевозок стал быстро возрастать [1]. Достаточно скоро определились три основных способа освоения перевозок.

Первый, начальный способ освоения возрастающих объемов перевозок – строительство новых магистральных железнодорожных линий. Дополнительным эффектом явилась возможность освоения регионов в промышленном и хозяйственном отношении с относительно небольшими начальными затратами.

Вторым способом стало постепенное повышение среднего веса составов грузовых поездов. Одновременно происходило увеличение как длины поездов за счет большего количества вагонов в них, так и грузоподъемности самих вагонов [2, 3].

Третий способ заключается в укладке дополнительных главных путей на магистральных линиях [4–6]. Так, на однопутных линиях могут устраиваться двухпутные вставки, а также сооружаться сплошные вторые главные пути [7]. Для особо загруженных двухпутных магистральных линий эффективно строительство третьего главного пути на отдельных перегонах.

Изменение эффективности различных способов освоения возрастающих объемов перевозок отражено в табл. 1. Можно предположить, что каждый из перечисленных способов имеет свою рациональную сферу практического применения в развитии сети и в эксплуатационной работе [8].

Пик строительства новых железнодорожных линий пришелся на XIX в. и первую половину XX в., с некоторыми перерывами, обусловленными кризисами регионального и мирового

масштаба, в том числе войнами. Начиная с середины XX в. существенную конкуренцию железнодорожному транспорту в ряде стран стал создавать быстро развивавшийся автомобильный транспорт. С учетом того что стоимость развития железнодорожной инфраструктуры по мере того, как она становилась все более сложной, также увеличивалась, все более актуальным становится вопрос об экономически целесообразных способах дальнейшего освоения возрастающих объемов перевозок и соответствующих способах развития сети железных дорог РФ и организации эксплуатационной работы. То есть о том, какой из приведенных выше способов повышения пропускной и провозной способности железных дорог рационально использовать в тех или иных условиях.

Методы исследования

На начальном этапе функционирования железнодорожного транспорта при относительно небольшой транспортной сети сооружение новых магистральных линий обеспечивало весьма значительный эффект с точки зрения повышения пропускных способностей и регионального развития. Однако по мере насыщения транспортной сети большее применение стали получать другие два способа, в частности повышение среднего веса составов грузовых поездов. Начиная с XX в., в связи с развитием автомобильного транспорта и совершенствованием технических средств железнодорожного транспорта, доля строительства новых железных дорог стала снижаться (рис. 1).

Возможности для повышения веса поездов обеспечивались новыми техническими решениями и совершенствованием вагонного и локомотивного парков, включая ввод в эксплуатацию более мощных локомотивов, широкое внедрение тепловозной и особенно электровозной тяги. Дополнительные возможности для повышения пропускной и провозной способностей также

**Качественная оценка эффективности различных способов освоения
возрастающих объемов перевозок**

Способ освоения объемов перевозок	Начало эпохи	Окончание эпохи
Строительство новых железнодорожных линий	На начальном этапе появления и развития железнодорожного транспорта строительство новых магистральных линий обеспечивало не только освоение возрастающих объемов перевозок, но и ускоренное развитие значительных территорий	Строительство новых железнодорожных линий и насыщение сети уменьшило эффективность освоения возрастающих объемов перевозок. Сократилась возможность освоения в промышленном и хозяйственном отношении больших территорий страны
Повышение среднего веса грузовых поездов	На начальном этапе новые железнодорожные линии строились с короткими длинами путей станций, которые сооружались на окраинах самых крупных в то время городов. Повышение веса грузовых поездов на начальном этапе функционирования железнодорожного транспорта обеспечивало значительное сокращение капитальных затрат и эксплуатационных расходов, связанных с освоением возрастающих объемов перевозок	При достижении среднего веса грузовых поездов порядка 4 000 т увеличились затраты, связанные с формированием грузовых поездов, повторной переработкой вагонов. Существенно возросла стоимость локомотивного парка. Увеличились затраты, связанные с выполнением работ по капитальному ремонту пути на магистральных железнодорожных линиях. Особо крупные капитальные затраты требуются для усиления технических средств железнодорожного транспорта, развития железнодорожных станций, особенно на территории крупных городов
Поэтапное переустройство однопутных железнодорожных линий в двухпутные, укладка дополнительных главных путей	На начальном этапе функционирования железнодорожного транспорта требуются крупные удельные капитальные затраты на малые объемы перевозок. Требуются крупные капитальные затраты на строительство дорогостоящих технических объектов, особенно в сложных горных условиях	При укладке дополнительных главных путей на существующих линиях пропуск большого количества составов грузовых поездов осуществляется с относительно малыми затратами. Основные капитальные затраты приходятся на строительство технических объектов инфраструктуры вне крупных узлов, в сельской местности, затраты на укладку новых дополнительных главных путей на перегонах невелики. Сокращаются затраты, связанные с выполнением работ по капитальному ремонту пути на магистральных железнодорожных линиях

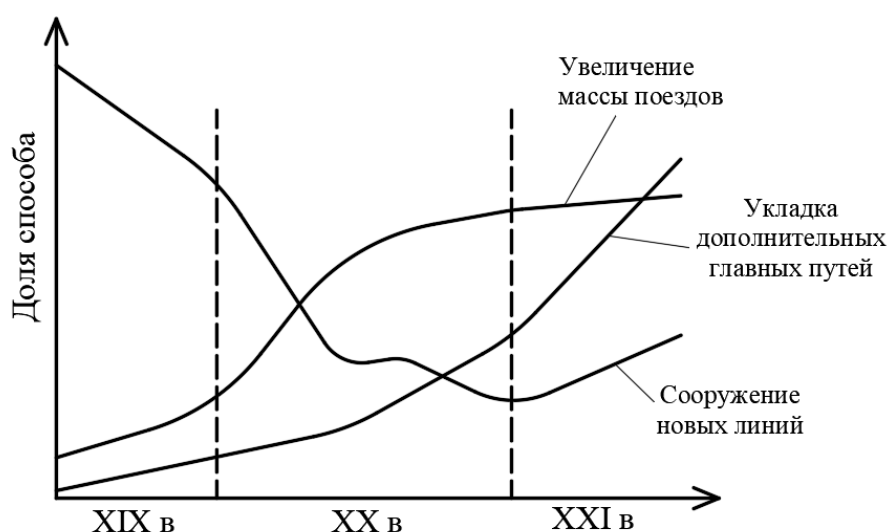


Рис. 1. Качественное соотношение различных мероприятий
по освоению возрастающих объемов перевозок

давало активное внедрение новых технических средств (автоблокировки и других средств СЦБ и связи), электрификация железнодорожных магистралей, усиление путевой инфраструктуры.

Кроме этого, на изначально широко распространенных однопутных линиях сооружались дополнительные разъезды и двухпутные вставки. В комплексе это позволило существенно нарастить пропускную способность за счет сокращения межпоездных интервалов на уже существующих линиях. Можно считать, что в этот период развитие технических средств инфраструктуры, а также совершенствование подвижного состава обеспечили повышение возможностей по перевозке грузов с использованием однопутных линий.

При дальнейшем увеличении потребных объемов перевозок возник вопрос об условиях эффективного использования третьего способа – строительства двухпутных вставок и вторых главных путей на однопутных перегонах.

Данный способ усиления технического оснащения железнодорожных линий на современном историческом этапе и в перспективе можно считать основным для дальнейшего освоения увеличивающихся объемов перевозок за счет повышения размеров движения на них, а также для увеличения участковой скорости за счет сокращения времени и количества стоянок поездов под скрещением и обгоном на разъездах.

Необходимо отметить, что каждый из трех описанных выше способов повышения провозной способности железных дорог сопряжен с потребностями инвестиций в развитие инфраструктуры и совершенствование нетягового и тягового подвижного состава, технических средств, инфраструктуры. Так, увеличение веса поездов, помимо потребности в более мощных локомотивах, требует удлинения станционных путей, а при увеличении осевых нагрузок – также усиления путевой инфраструктуры, земляного полотна и искусственных сооружений.

Оценка эффективности и условий рационального применения того или иного способа повышения пропускной и провозной способности железных дорог требует выполнения соответствующих технико-экономических расчетов. При этом необходимо учитывать следующие виды основных затрат:

- инвестиционные вложения в создание, а также совершенствование технических средств инфраструктуры, а также в подвижной состав;
- эксплуатационные расходы, зависящие и не зависящие от размеров движения. К пер-

вым следует отнести расходы по движению поездов, ко вторым – расходы по содержанию постоянных устройств и сооружений.

Необходимо отметить, что каждый из способов в тех или иных условиях будет иметь и технические ограничения. В частности, на возможность увеличения массы и длины поездов влияют тяговые и тормозные характеристики поездных локомотивов, параметры продольного профиля пути (прежде всего, величина руководящего уклона), полезная длина приемо-отправочных путей железнодорожных станций и возможности ее увеличения при реконструкции станций.

Отдельно следует отметить особенность, связанную с топологией отечественной сети железных дорог и основными маршрутами перевозок. Она состоит в том, что значительные объемы перевозок выполняются на весьма протяженных маршрутах. При этом с точки зрения рациональной технологии продвижения поездопотоков необходимо учитывать конструктивные и эксплуатационно-технологические ограничения на всем пути следования поездов.

Можно отметить, что при значительной дальности следования поездопотоков возрастает вероятность их обслуживания и переработки на технических станциях. Последние чаще всего не имеют путей достаточной длины, а необходимое переустройство крупных технических станций является не только весьма дорогостоящим, но зачастую существенно ограничивается местными условиями. Еще одним негативным фактором, ограничивающим возможности увеличения массы и длины поездов, является повышенная нагрузка на путевую инфраструктуру и технические средства. В этих условиях значительно возрастает экономическая и эксплуатационная стоимость отказов технических средств.

В связи с этим более эффективной мерой по увеличению пропускной и провозной способности железных дорог может оказаться не повышение веса и длины поездов, а развитие линейной инфраструктуры с укладкой дополнительных вторых главных путей на перегонах, а в ряде случаев и третьих.

Для технико-экономического обоснования перехода от однопутных перегонов к двухпутным требуется учитывать не только пропускную способность, но и задержки, возникающие при пропуске встречных поездопотоков по однопутным элементам [9]. Ликвидация этих задержек, связанных со скрещением поездов и

недостатком пропускной способности однопутных перегонов, при укладке дополнительных главных путей обеспечит не только рост пропускной способности, но и увеличение участковой и маршрутной скорости. Одним из косвенных эффектов станет увеличение пробега локомотивов и потенциальная возможность увеличения расстояния между техническими станциями, пунктами смены локомотивных бригад. В пределах полигона и сети в целом это также будет способствовать сокращению сроков доставки и снижению себестоимости перевозок.

Для оценки технологических возможностей однопутных перегонов предлагается использовать метод имитационного моделирования пропуска поездопотоков. Представленные далее результаты расчетов получены с использованием имитационной модели «Барьер-2» [10, 11], в которой однопутные перегоны рассматриваются в качестве барьерных мест, ограничивающих пропускную способность. Модель позволяет определять пропускную способность однопутных элементов участка, количество и длительность задержек в пропуске поездов, которые легко могут быть трансформированы в соответствующие эксплуатационные расходы для сравнения вариантов однопутных и двухпутных перегонов (с использованием соответствующих расходных ставок по задержкам поездов).

Результаты исследования

В качестве объекта исследования рассматривался условный однопутный перегон (барьерный элемент), протяженность которого оцени-

валась опосредованно, через время занятия перегона поездом [12]. Барьерный элемент с обеих сторон ограничивается зонами задержки, которые отображают время задержки пропуска каждого поезда. Под зонами задержки можно понимать отдельные пункты, ограничивающие барьерный элемент, двухпутные вставки или участки со сплошным вторым главным путем (если они разделяются рассматриваемым однопутным барьерным элементом).

Рассматривались вариативные условия пропуска встречных поездопотоков: непакетный график движения поездов (ГДП) и пакетный с количеством поездов в пакете, равным двум и трем; время хода по однопутному перегону, равное 10, 15, 20 и 25 мин для поезда каждого направления.

Сводный план модельных экспериментов приведен в табл. 2.

На рис. 2 (для эксперимента 1) представлен вид графика прохода поездами барьерного однопутного элемента, на рис. 3 – гистограмма задержек поездопотока. В данных условиях межпоездной интервал заметно превышает перегонное время хода, поэтому существенных задержек не возникает: максимальное время задержки для условий незначительного поездопотока не превышает 11 мин. Однако ситуация существенно меняется при увеличении размеров движения – см. рис. 4 и 5 (пример для эксперимента 3). В этом случае по величине задержек видно, что однопутный элемент работает в критическом режиме, что прямо указывает на целесообразность укладки второго главного пути.

Таблица 2

План модельных экспериментов

Номер эксперимента	Тип ГДП	Минимальный интервал между поездами, мин	Время хода по перегону, мин	Количество поездов в пакете	Интервал между поездами в пакете
1	Непакетный	20	10	—	—
2			15		
3			20		
4			25		
5	Пакетный		10	2	10
6			15		
7			20		
8			25		
9			10	3	10
10			15		
11			20		
12			25		

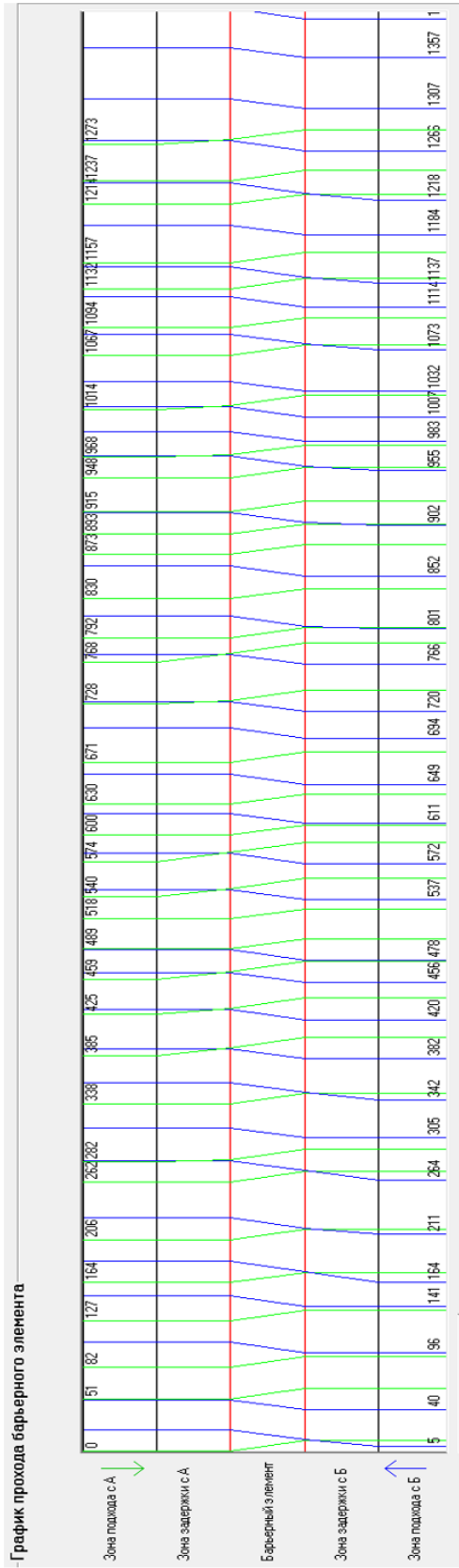


Рис. 2. График проследования поездов через однопутный элемент, эксперимент 1

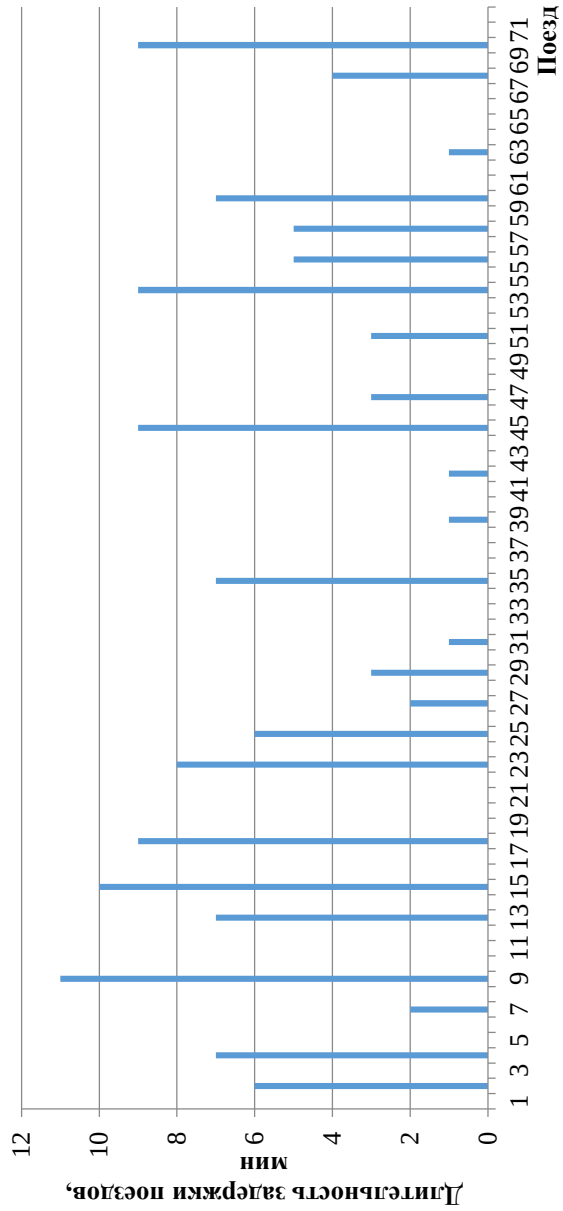


Рис. 3. Задержки при пропуске поездопотоков, эксперимент 1

Примечание. По оси абсцисс показаны порядковые номера поездов в суммарном потоке четного и нечетного направлений (в порядке подхода к однопутному барьерному элементу).

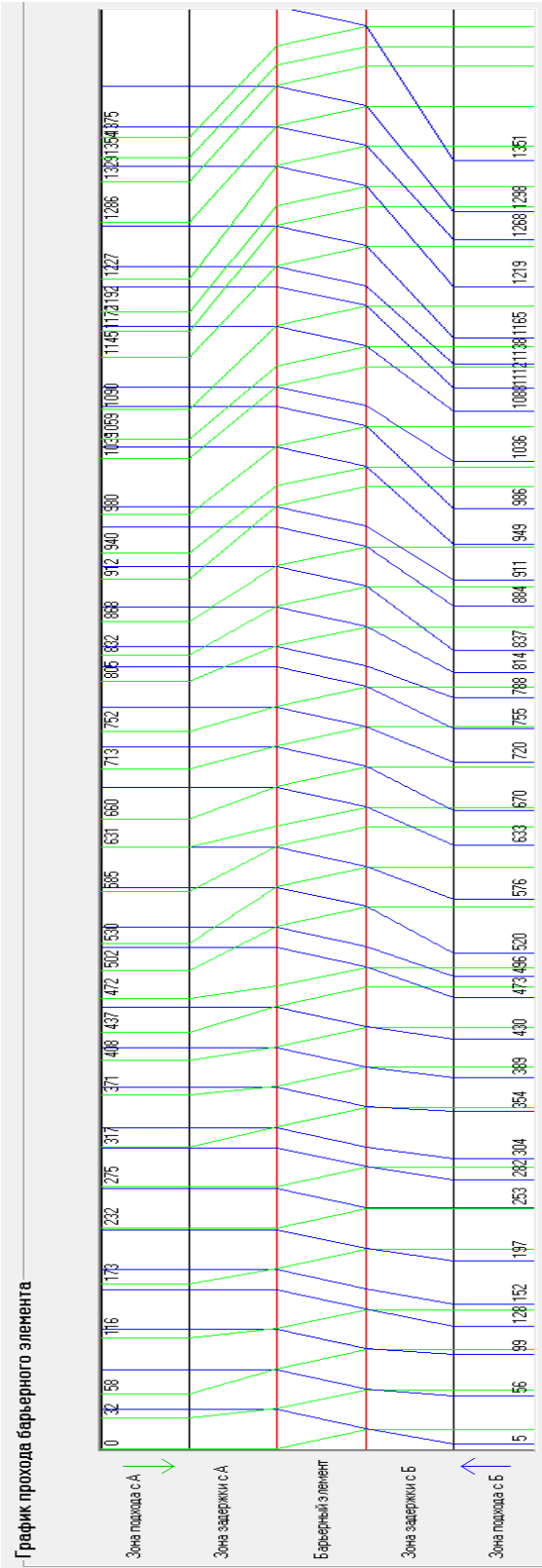


Рис. 4. График проследования поездов через однопутный элемент, эксперимент 3

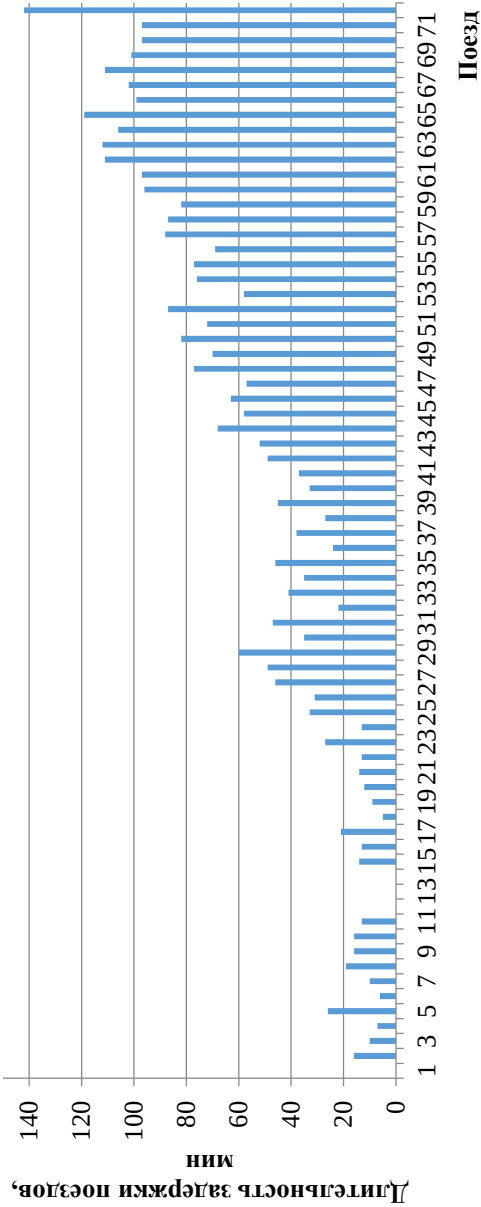


Рис. 5. Задержки при пропуске поездопотоков, эксперимент 3

Итоги статистической обработки всех экспериментов представлены в табл. 3. Полученные результаты могут использоваться при принятии решений по укладке второго главного пути с учетом не только пропускной способности однопутных перегонов, но также количества и времени задержек (с учетом путевого развития ограничивающих однопутный элемент линейных объектов инфраструктуры). Длительность задержки можно трансформировать в соответствующие эксплуатационные расходы для дальнейшего использования в технико-экономических расчетах по укладке второго главного пути.

Таблица 3

Результаты расчета задержек поездопотока на однопутном элементе

Номер эксперимента	Математическое ожидание времени задержки поезда, мин	Среднее квадратическое отклонение, мин
1	1,9	3,2
2	4,8	8,6
3	49,9	36,6
4	220,7	123,0
5	14,9	11,9
6	169,9	91,0
7	467,9	249,8
8	861,2	489,9
9	70,6	29,9
10	444,1	233,4
11	779,0	441,7
12	1 065,6	618,5

Выводы

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В процессе развития железнодорожного транспорта менялись основные способы освоения возрастающих объемов перевозок: строительство новых железнодорожных линий, повышение веса грузовых поездов, строительство вторых главных путей на магистральных однопутных железнодорожных линиях.

2. На начальном этапе развития технических средств железнодорожного транспорта основное внимание уделялось строительству новых железнодорожных линий, что не только позволяло увеличивать пропускную и провозную способности железных дорог, но и способствовало активизации хозяйственного освоения значительных территорий нашей страны с меньшими затратами.

3. После насыщения сетью железных дорог основных территорий приоритет в развитии транспорта стал смещаться на повышение среднего веса составов грузовых поездов, что в совокупности с развитием технических средств (тягового и нетягового подвижного состава, систем СЦБ, электрификации и других объектов и систем инфраструктуры) обеспечило рост провозных способностей и освоение возрастающих объемов перевозок.

4. В перспективе важной научно-практической задачей следует считать обоснованное усиление существующих железнодорожных линий, прежде всего за счет укладки дополнительных главных (вторых, третьих) путей. Помимо роста пропускной и провозной способностей, это обеспечит сокращение задержек и повышение интенсивности пропуска поездопотоков по сети железных дорог РФ.

5. Технико-экономическое обоснование перехода от однопутных перегонов к двухпутным требует использования методов моделирования пропуска поездопотоков через однопутные перегоны, которые можно рассматривать в качестве барьерных мест, ограничивающих пропускную способность. Для этого может использоваться имитационная модель «Барьер-2», результаты выборочных расчетов по которой для различных условий пропуска поездопотоков и параметров однопутных перегонов представлены в данной статье.

Список источников

1. Левин Д. Ю. Развитие сети железных дорог в России в XIX веке // Железнодорожный транспорт. 2022. № 10. С. 39–45. EDN SWVMGL.
2. Дмитренко А. В., Идер Б. Принципы установления рационального веса и длины грузовых поездов по направлениям движения для однопутных железнодорожных линий // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте : сборник трудов научно-практической конференции с международным участием, Москва, 20–21 октября 2021 года. Москва : Российский университет транспорта, 2022. С. 127–133. EDN BLEQTX.
3. Левин Д. Ю. Расчет и оценка эффективности использования перевозочных возможностей железных дорог // Наука и технологии железных дорог. 2023. Т. 7, № 3 (27). С. 8–17. EDN WXTRMC.

4. Одуденко Т. А., Агапова Ю. Ю., Танайно Ю. А. Возможности поэтапного увеличения пропускных способностей на однопутных направлениях Дальневосточного региона // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2019. № 2 (49). С. 40–44. EDN BMVKHI.
5. Агапова Ю. Ю., Одуденко Т. А. Анализ пропускной способности однопутных участков Забайкальской железной дороги // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2019. № 4 (21). С. 20–22. EDN NEEXSU.
6. Северомуйский тоннель: развитие с учетом пропускной способности / А. В. Дмитренко, С. В. Карасев, К. В. Королев, А. Д. Калидова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2021. № 1 (69). С. 88–96. DOI 10.26731/1813-9108.2021.1(69).88-96. EDN HOPUIU.
7. Сивицкий Д. А., Осипов Д. В. Анализ вариантов развития раздельных пунктов при проектировании двухпутных вставок // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2020. № 2 (53). С. 21–29. EDN XWLGRP.
8. Черняк А. Р. Методика технико-экономического обоснования перехода от однопутного перегона к двухпутной вставке на специализированных грузовых линиях // Дни науки – 2025 : материалы регионального форума (Новосибирск, 14–26 апреля 2025 г.). В 2 ч. Ч. 1. Технические науки. Новосибирск : Сибирский государственный университет путей сообщения, 2025. С. 32–36. EDN FEMIEB.
9. Карасев С. В., Корягин М. Е. Оценка задержек поездов на железнодорожной сети методом моделирования в условиях случайного образования заявок на перевозку // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2018. № 2 (45). С. 43–51. EDN UZCUBQ.
10. Калидова А. Д. Алгоритм пропуска скоростных поездов через барьерные места инфраструктуры // Политранспортные системы : материалы IX Международной научно-технической конференции, Новосибирск, 17–18 ноября 2016 года. Новосибирск : Сибирский государственный университет путей сообщения, 2017. С. 22–29. EDN ZWVQEV.
11. Калидова А. Д. Разработка метода технологической оценки процесса пропуска поездопотоков через однопутное барьерное место двухпутной линии на основе имитационного моделирования // Транспорт Урала. 2017. № 2 (53). С. 102–108. DOI 10.20291/1815-9400-2017-2-102-108. EDN YUNJCB.
12. Карасев С. В., Черняк А. Р. Определение максимальной допустимой длины однопутных элементов специализированной грузовой линии по условию достаточности наличной пропускной способности // Транспорт Урала. 2024. № 3 (82). С. 32–41. DOI 10.20291/1815-9400-2024-3-32-41. EDN CSHUVJ.

References

1. Levin D. Yu. Development of the railway network in Russia in the 19th century. *Railway Transport*. 2022;(10):39–45. (In Russ.). EDN SWVMGL.
2. Dmitrenko A. V., Ider B. Principles of establishing a rational weight and length of freight trains in the directions of travel for single-track railway lines. *Innovative Technologies in Railway Transport: Proceedings of the Scientific and Practical Conference with International Participation, Moscow, October 20–21, 2021*. Moscow: Russian University of Transport; 2022. P. 127–133. (In Russ.). EDN BLEQTX.
3. Levin D. Yu. Calculation and assessment of the efficiency of using the transportation capabilities of railways. *Science and Technology of Railways*. 2023;7(27):8–17. (In Russ.). EDN WXTRMC.
4. Odudenko T. A., Agapova Yu. Yu., Tanaino Yu. A. Possibilities of a phased increase in throughput capacities on single-track routes in the Far Eastern region. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2019;(49):40–44. (In Russ.). EDN BMVKHI.
5. Agapova Yu. Yu., Odudenko T. A. Analysis of the throughput capacity of single-track sections of the Trans-Baikal Railway. *Transport of the Asia-Pacific Region*. 2019;(21):20–22. (In Russ.). EDN NEEXSU.
6. Dmitrenko A. V., Karasev S. V., Korolev K. V., Kalidova A. D. Severomuysky tunnel: development taking into account throughput. *Modern Technologies. Systems Analysis. Modeling*. 2021;(69):88–96. (In Russ.). DOI 10.26731/1813-9108.2021.1(69).88-96. EDN HOPUIU.
7. Sivitsky D. A., Osipov D. V. Analysis of development options for separation points when designing double-track inserts. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2020;(53):21–29. (In Russ.). EDN XWLGRP.
8. Chernyak A. R. Methodology for the feasibility study of the transition from a single-track section to a double-track insert on specialized freight lines. *Days of Science – 2025: Proceedings of the Regional Forum. In 2 parts, Novosibirsk, April 14–26, 2025*. Novosibirsk: Siberian Transport University; 2025. P. 32–36. (In Russ.). EDN FEMIEB.
9. Karasev S. V., Koryagin M. E. Estimation of train delays on the railway network by the simulation method under conditions of random formation of transportation requests. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2018;(45):43–51. (In Russ.). EDN UZCUBQ.

10. Kalidova A. D. Algorithm for passing high-speed trains through infrastructure barriers. *Polytransport Systems: Proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference, Novosibirsk, November 17–18, 2016*. Novosibirsk: Siberian Transport University; 2017. P. 22–29. (In Russ.). EDN ZWVQEV.

11. Kalidova A. D. Development of a method for technological assessment of the process of passing train flows through a single-track barrier place on a double-track line based on simulation modeling. *Transport of the Urals*. 2017;(53):102–108. (In Russ.). DOI 10.20291/1815-9400-2017-2-102-108. EDN YUNJCB.

12. Karasev S. V., Chernyak A. R. Determination of the maximum permissible length of single-track elements of a specialized freight line based on the condition of sufficiency of the available throughput. *Transport of the Urals*. 2024;(82):32–41. (In Russ.). DOI 10.20291/1815-9400-2024-3-32-41. EDN CSHUVJ.2.

Информация об авторах

А. В. Дмитренко – доктор технических наук, профессор кафедры «Железнодорожные станции и узлы» Сибирского государственного университета путей сообщения.

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

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

Information about the authors

A. V. Dmitrenko – Doctor of Engineering, Professor of the Railway Stations and Junctions Department, Siberian Transport University.

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

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

Статья поступила в редакцию 23.04.2026; одобрена после рецензирования 05.05.2026; принята к публикации 07.05.2026.

The article was submitted 23.04.2026; approved after reviewing 05.05.2026; accepted for publication 07.05.2026.

Научная статья
УДК 656.225.073.436.08:614.84
doi:10.52170/1815-9265_2026_79_60

Теоретическое исследование свойств опасных грузов подкласса 2.1 – углеводородных газов для предупреждения рисков развития техногенных чрезвычайных ситуаций на железнодорожном транспорте

Владимир Ильич Медведев^{1✉}, Дмитрий Валерьевич Ануфриев²,
Михаил Дмитриевич Сурков³

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

³ ООО «ПК Дельта», Новосибирск, Россия

¹ MedvedevVI2017@yandex.ru✉

² anufriewdima@yandex.ru

³ rulka@gmail.com

Аннотация. Углеводородные газообразные соединения играют важную роль в современной экономике. Мировой годовой объем добычи природных углеводородов составляет внушительную величину – $4,10^{12}$ м³. Они находят применение в качестве энергоносителей, сырья для производства органических и неорганических веществ, материалов, изделий и в других сферах. Для транспортировки (перевозки) углеводородных газов (в различных физических состояниях, например сжатым, сжиженным или растворенным) используются все виды транспорта. В работе акцент сделан на перевозке по железным дорогам, погрузка сжиженных углеводородных газов в 2025 г. составила 13,4 млн т. Основной объем приходится на трубопроводный транспорт, однако существенную роль играют также морские, речные, автомобильные и в меньшей степени авиационные перевозки.

Низкомолекулярные углеводородные соединения, в том числе 24 номенклатурные позиции индивидуального состава, Комитетом экспертов ЭКОСОС ООН по перевозке опасных грузов, в соответствии с согласованной на глобальном уровне системой классификации и маркировки химических веществ, отнесены к опасным грузам класса 2 (газы), подкласса 2.1 (воспламеняющиеся газы). Наряду с полезными потребительскими свойствами, горючестью и высоким теплосодержанием углеводородные газы обладают способностью к взрыву, взрывчатому превращению в трудно контролируемых условиях. Проявление в транспортном процессе данного свойства представляет существенную опасность, что отражено в запрете роспуска вагонов-цистерн с такими грузами с сортировочных горок. Запрет роспуска существенно снижает технико-экономические показатели работы сортировочных станций.

Данная работа является продолжением исследований, проводимых в университете в 2005–2010 гг. по договорам с ОАО «Российские железные дороги». В настоящее время проблема не потеряла свою актуальность и привлекает внимание специалистов отрасли. Данное исследование посвящено изучению характеристик груза, выявлению в первую очередь закономерностей взрыва и горения углеводородных газов, попыткам дифференцировать соединения и условия «по степени опасности». В серии работ мы планируем изучить влияние на протекание и результат реакций структурных, термодинамических, кинетических, феноменологических, экологических и экономических факторов; осуществить поиск наименее опасных газов и наименее опасных условий для подготовки программы экспериментов (сначала численных, а затем натурных) по роспуску вагонов-цистерн с сортировочных горок. Следует отметить, что на роспуск с сортировочных горок порожних вагонов-цистерн из-под углеводородных газов также действует запрет.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, запрет роспуска вагонов, взрывопожарные свойства, опасные грузы подкласса 2.1, риск, углеводородные газы, углеводородо-воздушные смеси

Для цитирования: Медведев В. И., Ануфриев Д. В., Сурков М. Д. Теоретическое исследование свойств опасных грузов подкласса 2.1 – углеводородных газов для предупреждения рисков развития техногенных чрезвычайных ситуаций на железнодорожном транспорте // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 2 (79). С. 60–69. DOI 10.52170/1815-9265_2026_79_60.

A theoretical study of the subclass 2.1 hazardous goods properties – hydrocarbon gases to prevent the risks of developing man-made emergencies in rail transport

Vladimir I. Medvedev¹, Dmitry V. Anufriev², Mickael D. Surkov³

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

³ LLC PK Delta, Novosibirsk, Russia

¹ MedvedevVI2017@yandex.ru

² anufriewdima@yandex.ru

³ rulka@gmail.com

Abstract. Hydrocarbon gaseous compounds play important role in the modern economy of the early 21st century. The global annual production of natural hydrocarbons amounts to an impressive $4 \cdot 10^{12}$ m³. They are used as energy carriers, raw materials for the production of organic and inorganic substances, materials, products, and in other areas. All types of transport are used for the transportation of hydrocarbon gases (in various physical states, such as compressed, liquefied, or dissolved). This work focuses on rail transport; loading of liquefied hydrocarbon gases in 2025 is estimated at 13.4 million tons. The main volume is carried by pipeline transport, but marine, river, road, and, to a lesser extent, air transport also play a significant role.

Low-molecular hydrocarbon compounds, including 24 nomenclature positions of individual compositions, have been classified by the UN ECOSOS Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods and in accordance with the Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals as dangerous goods of Class 2 (gases) and subclass 2.1 (flammable gases). Alongside their useful consumer properties, combustibility, and high calorific value, hydrocarbon gases have the potential for explosion and explosive transformation under difficult-to-control conditions. The manifestation of this property during transport poses a significant hazard, which is reflected in the prohibition of shunting tank cars with such cargoes from hump yards. The prohibition of shunting significantly reduces the technical and economic performance of classification yards.

This work is a continuation of research conducted at the university from 2005 to 2010 under contracts with Russian Railways. At present, the problem has not lost its relevance and continues to attract the attention of industry specialists. This work is devoted to studying the characteristics of cargo, primarily identifying the patterns of explosion and combustion of hydrocarbon gases, and attempting to differentiate conditions 'by degree of danger'. In a series of studies, we plan to examine the influence of factors such as structural, thermodynamic, kinetic, phenomenological, environmental, and economic on the course and outcome of reactions; to search for the least dangerous gases and the least hazardous conditions for preparing an experimental program, first numerical, then full-scale, for the unloading of tank cars from hump yards. It should be noted that there is also a prohibition on unloading empty tank cars that previously carried hydrocarbon gases from hump yards.

Keywords: railway transport, risk, ban on the dismantling of railcars, explosion and fire properties, dangerous goods of division 2.1, hydrocarbon gases, hydrocarbon-air mixtures

For citation: Medvedev V. I., Anufriev D. V., Surkov M. D. A theoretical study of the subclass 2.1 hazardous goods properties – hydrocarbon gases to prevent the risks of developing man-made emergencies in rail transport. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(79):60–69. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_79_60.

Введение

Углеводородные газообразные соединения (УГС) – это углеводороды в газообразном состоянии при нормальных условиях: давлении $P = 101,3$ кПа и температуре $T = 293$ К. Для транспортировки (перевозки) УГС в различных физических состояниях – растворенном, сжатом или сжиженном – используются все виды транспорта, в работе акцент сделан на перевозке по железной дороге. Погрузка сжиженного углеводородного газа (СУГ) в 2025 г. составила 13,4 млн т [1], или 250–270 тыс. вагонов-цистерн (ВЦ). Основной объем доставки приходится на трубопроводный транспорт, однако существенную роль играют также морские, речные, автомобильные, авиа-

ционные и в определенном смысле космические перевозки.

При образовании углеводородо-воздушных смесей (УВС) они воспламеняются, если объемное содержание воздуха не более 13 %-об. в смеси, или диапазон воспламеняемости не менее 12 % независимо от нижнего предела воспламеняемости. Основные методы изложены в стандарте ИСО 10156:2017 [2]. Объектом настоящего исследования являются ИУГС – индивидуальные (стехиометрические) низкомолекулярные УГС с химической формулой C_xH_y , где индексы X, Y – числа атомов углерода и водорода в молекуле соответственно, целые натуральные числа, могут принимать значения: $X = 1, 2, 3, 4, 5$; $Y = 2, 4, 6, 8$,

10, 12. Минимальные значения $X = 0$ соответствуют водороду, $Y = 0$ – углероду (саже); значения $X > 5$ и $Y > 12$ – конденсированным при нормальных условиях УГС. Эти УГС, а также их смеси и фракции, имеющие не менее важное практическое значение, будут рассмотрены на следующих этапах работы.

В природе углеводороды встречаются в различных видах и состояниях, в том числе в виде газов нефтяных и газовых месторождений. Также к ним относят попутные нефтяные газы – смеси различных углеводородов, растворенных в нефти и выделяющихся в процессе ее добычи и перегонки. Актуальность темы исследования обусловлена тем, что УГС, играющим чрезвычайно важную роль в современной мировой экономике, в транспортном процессе, а также в промышленном и бытовом потреблении, свойственна опасность и высокий риск аварийных ситуаций. Объем добычи природных углеводородов контролируется международными организациями и составляет величину порядка $4 \cdot 10^{12}$ м³/год. Основными сферами применения являются:

- 1) традиционный относительно «экологически чистый» энергоноситель;
- 2) сырье для производства критически важных материалов, изделий и веществ, в том числе органических полимеров, азотных удобрений и компонентов смесевых взрывчатых веществ, технического углерода.

Низкомолекулярные УГС, газообразные и конденсированные, природные и синтетические, Комитетом экспертов ЭКОСОС ООН по перевозке опасных грузов [3], в соответствии с согласованной на глобальном уровне системой классификации и маркировки химических веществ, отнесены к опасным грузам класса 2 (газы), подкласса 2.1 (воспламеняющиеся газы). Наряду с полезными потребительскими свойствами, горючестью и высоким теплосодержанием углеводородные газы обладают способностью к взрыву, взрывчато-превращению в трудно контролируемых условиях. Проявление в транспортном процессе данного свойства представляет существенную опасность, что отражено в запрете розпуска ВЦ с такими грузами с сортировочных горок [4–6]. Запрет розпуска существенно снижает технико-экономические показатели работы сортировочных станций и усложняет эксплуатационную работу железных дорог.

Данная работа является продолжением исследований, проводимых в университете рабочей группой специалистов факультета УПП [7] в 2005–2010 гг. по договорам с ОАО «Российские железные дороги». В последующие годы предпринимались инициативные попытки анализа новых подходов [8, 9]. В настоящее время проблема не потеряла свою актуальность и привлекает внимание специалистов отрасли.

Материалы и методы исследования

Материалы и методы исследования основаны на методическом подходе, принятом, например, в работах [7, 10, 11] и оправдавшем себя в теоретическом и практическом планах, поскольку в них изложены принципы и алгоритмы, на которых базируются действующие нормы [5]. В свою очередь, метод основывается на системном анализе теории и практики управления безопасностью перевозок опасных грузов, прежде всего в части работы сортировочных станций по переработке отцепов и вагонов с запрещенными к розпуску грузами. Этот элемент системного анализа назван нами акцидентальной многофакторной компаративистикой, сущность которой заключается в следующем:

- 1) в изучении фактов, которые априори случайны: внешние условия не повторяются, их невозможно повторить в наиболее важных сущностных частях даже в условиях эксперимента;
- 2) в изучении типологии и повторяемости фактов.

В анализе мы исходим из формулы события:

$\{ОПС(T - t_0)[(ОГ = УГС) TC(T - t_0)] PC(T - t_0)\} ЧФ$,
где *ОПС* – окружающая природная среда; *ОГ* – опасный груз (*УГС*); *ТС* – транспортное средство; *ПС* – подвижной состав; $(T - t_0)$ – период времени от случившегося факта t_0 до момента рассмотрения T ; *ЧФ* – человеческий фактор.

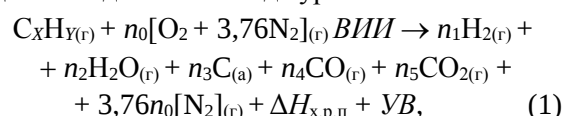
Управление безопасностью в данном случае – мониторинг штатного состояния основных факторов транспортного процесса.

Объект исследования выбран с учетом сложности, многофакторности и многокомпонентности задачи, которая в настоящей постановке не решена за последние десятилетия, несмотря на усилия и определенный технический прогресс, значительное число опубликованных

научно-технических работ. В рамках намеченной дорожной карты работы, которая, как мы полагаем, должна завершиться разработкой плана экспериментальных испытаний с включением плана оборудования станции, в качестве объекта исследования выбраны ИУГС, которым присвоен персонафицированный номер ООН (UN-number) [3]. Наличие номера означает широкую распространенность и практическую значимость этих веществ. Характеристика элементного состава и номера ООН совокупности таких грузов представлена в табл. 1. Показатель изомерии Z является характеристикой гомологических рядов углеводородов разного строения $C_xH_{2(x+Z)}$. К структурным особенностям гомологов относят: длину углеродной цепи, в которой атомы соединены σ -связями, изомерию цепи, замыкание цепи в цикл, наличие, число и положение кратных π -связей – двойных и тройных. Наличие кратных π -связей в молекуле свидетельствует о возможности спонтанной полимеризации, в связи с чем такие грузы перевозятся в защищенном, стабилизированном состоянии с указанием в надлежащем транспортном наименовании. На этот фактор имеет смысл обратить внимание: если производитель и отправитель имеет возможность стабилизировать УГС от полимеризации, то возникает вопрос возможности «стабилизации от возгорания и взрыва». Общее число теоретически возможных ИУГС при X от 1 до 5 составляет 28, из них 24 имеют практиче-

ское значение. Данные табл. 1 используются для исследования структурных зависимостей при изучении реакций УВС.

Модель взрыв – горение углеводородных соединений (МВГУГС) основывается на ключевых понятиях теории горения и взрыва газов [12]. Пределы и условия перехода горения УГС во взрыв и взрыва в горение трудно формализуемы, но могут быть установлены важные закономерности. Реакции взрыва и горения УВС – окислительно-восстановительные процессы, которые можно представить в общем объединенном виде уравнения



где (а), (г) – индексы агрегатного состояния вещества: аэрозолеобразное (конденсированное) и газообразное; n_0 – стехиометрический коэффициент кислорода в химической реакции; $[O_2 + 3,76N_2]_{(r)}$ – обозначение воздушной среды в естественном соотношении основных компонентов (кислорода и азота); *VIII* – внешний источник инициирования; $n_1, n_2, \dots, n_5$ – стехиометрические коэффициенты (мольные доли) продуктов реакции; $\Delta H_{x.p.l}$ – энтальпия процессов химической реакции, соответствует энтальпии взрыва $\Delta H_{x.p.v}$ или горения $\Delta H_{x.p.g}$ соответственно; UB – ударная волна, образующаяся только в реакции взрыва, в реакции горения формальное условие: $UB = 0$.

Таблица 1

Таблица номеров ООН углеводородных газов, состав которых представлен в форме зависимости от числа атомов углерода в молекуле X и показателя изомерии Z

X	Z				
	+1	0	0-цикл	–1	–2
1	1971 1972	– ¹⁾	– ¹⁾	– ¹⁾	– ¹⁾
2	1035 1961	1038 1962	– ¹⁾	1001 3374 ⁴⁾	– ¹⁾
3	1978	1077	1027	1954 ⁴⁾ (пропин)	2200
4	1011 1966 ²⁾	1012 1055 ²⁾	2601	1010 2452	3161
5	1265 ³⁾ 2044	1108 ³⁾ 2459 ³⁾ 2460 ³⁾	1146 ³⁾	2371 ³⁾ 2561 ³⁾ 3295 ⁴⁾ (пентадиен-1,3)	1218 ³⁾

¹⁾ Соединение не существует по структурным причинам.

²⁾ Изомерия углеродной цепи.

³⁾ Отнесен к классу 3 (отличие, т. е. граница, между ИУГС классов 2 и 3 довольно условное в пределах решаемой задачи).

⁴⁾ Вещества, указанные в правилах, но отнесенные к номерам ООН обобщенных рубрик (обобщенные наименования, не указанные конкретно).

Взрыв УГС отличается от горения скоростью, он «быстрее». В рамках теоретических концепций Н. Н. Семенова – Я. Б. Зельдовича за счет высокой скорости разложения нарушается тепловой баланс теплоприход – теплоотдача, и тогда метастабильность молекул приводит к образованию взрывных газов, а они, в свою очередь, формируют ударную волну.

МВГУГС позволяет рассчитывать условия протекания процессов и моделировать их последствия на основе известных справочных данных, например [13]. Результаты моделирования условий перехода горения УГС во взрыв и взрыва в горение на основе [14], имеющих важное научное и практическое значение, будут представлены на следующем этапе исследований.

Результаты исследования

Применимость модели была продемонстрирована нами при обосновании разработки «Методики прогноза экологических последствий техногенных чрезвычайных ситуаций (пожаров и взрывов) с опасными грузами» [15]. МВГУГС строится на алгоритме – интерпретации уравнения (1), который учитывает первичные физико-химические процессы; в первом варианте не приняты в расчет вторичные процессы – окисление водорода и СО, ионизация и диссоциация азота и т. п., поскольку их вклад, вероятно, незначителен. Процесс реакции УВС инициируется ВИИ, причем в ряде случаев реакция протекает без кислорода [13, 16]: $n_0 = 0$. Определяем, что основными продуктами являются газообразные: водород – H_2 , вода – H_2O , углерод (сажа) – C (для упрощения представляется в аэрозольной форме $C_{(a)}$), углерода оксид (II) – СО и углерода оксид (IV) – CO_2 . Качественный и количественный состав продуктов зависит от состава углеводорода X, Y и состава УВС, характеризующегося коэффициентом n_0 . В рамках модели горение рассматривается как крайний вариант – «вырожденный» взрыв, при котором не образуется ударная волна ($VB = 0$) и энтальпия взрыва является энтальпией горения: $\Delta H_{x.p.l} = \Delta H_{x.p.g.}$. Из процессов горения также примем крайний случай «идеального» горения, при котором углеводород полностью, стехиометрически окисляется, не образуя каких-либо побочных продуктов. Коэффициенты, по сути мольные доли продуктов, n_1, n_2, n_3, n_4, n_5

взаимосвязаны и зависят от стехиометрии углеводорода X, Y и концентрационного фактора n_0 .

Последовательность изменения качественного и количественного состава продуктов в зависимости от доли ИУГС в УВС, или, иначе, от коэффициента n_0 , представлена на рис. 1. Согласно модели можно выделить четыре так называемые узловые точки (УТ), в которых преломляется «плавность» процесса. Первой узловой точкой УТ-1 отвечает $n_0 = 0$ (минимальное значение), при котором образуются два продукта в количестве XC и $0,5YH_2$. При малых значениях n_0 , между точками УТ-1 и УТ-2 продуктами реакции выступают вода $H_2O_{(r)}$, водород $H_{2(r)}$ и углерод $C_{(r)}$. По мере возрастания n_0 увеличивается доля воды и снижается доля H_2 до следующей узловой точки $n_0 = 0,5Y$. Между точками УТ-2 и УТ-3 ($n_0 = 0,5Y + X$) увеличение n_0 приводит к образованию СО за счет окисления сажи. Дальнейшее увеличение n_0 снижает долю СО и увеличивает долю CO_2 до предельного состояния – полного стехиометрического окисления углеводорода при горении, что отвечает УТ-4 при $n_0 = 0,5Y + 2X$ – условию «идеального» горения и максимальному значению кислорода при окислении.

Зависимости, приведенные на рис. 1, можно применить для оценки параметров горения и взрыва.

Следует учитывать, что в процессе (1) должен соблюдаться материальный, электронный и энергетический баланс (табл. 2). Элементы трансформируются в определенное количество форм: углерод (восстановитель) – в четыре, водород (восстановитель) – в три, кислород (окислитель) – в две, азот в одну неизменную форму. Окислительно-восстановительные (redox-) процессы протекают за счет поляризации и разрыва σ - и π -ковалентных связей $C-H$ и переноса электронов с восстановлением атомарного кислорода, как показано в табл. 2. Процессы образования атомарного углерода $C_{(a)}^-$ и молекулярного водорода H_2 происходят без переноса заряда и в электронном балансе не учитываются. Итоговое соотношение выражается уравнением

$$n_0 - n_5 - 0,5n_4 - 0,5n_1 = 0. \quad (2)$$

В табл. 3 представлены формулы расчета энергетического баланса по упрощенной формуле зависимости энтальпии химической

C_xH_Y	-1	-1	-1	-1
O_2	-0	-0.5Y	-0.5Y+X	-0.5Y+2X
CO_2	-0	-0	-0	-X
CO	-0	-	-	-
C	-X	-0	-0	-0
H_2O	-0	-0.5Y	-0.5Y	-0.5Y
H_2	-0.5Y	-0	-0	-0
n_0 , узловые точки	УТ-1 (мин.): $n_0 = 0$	УТ-2: $n_0 = 0.5Y$	УТ-3: $n_0 = 0.5Y + X$	УТ-4 (макс.): $n_0 = 0.5Y + 2X$

Рис. 1. Последовательность изменения концентрации исходных веществ качественного и количественного состава продуктов в зависимости от коэффициента n_0 в узловых точках в соответствии с МВГУС

Таблица 2

Соотношения материального элементного баланса процесса (1), электронного состояния элементов в соединениях, redox-процессов при горении и взрыве

Элемент	Число атомов	Результирующее число	Электронное состояние элементов	Redox-процессы
Углерод (C)	X	$X - (n_3 + n_4 + n_5) = 0$	$C_x^-H_Y$, C^0 , $C^{+2}O$, $C^{+4}O_2$	$n_5 C_x^- - 4n_5 e^- \rightarrow n_5 C^{+4}$ $n_4 C_x^- - 2n_4 e^- \rightarrow n_4 C^{+2}$ $C_x^- - 0e^- \rightarrow C^0$
Водород (H)	Y	$Y - (2n_1 + 2n_2) = 0$	C_xH_Y , $H_2^{+1}O$, H_2^0	$n_1 2H_Y - 2n_1 e^- \rightarrow n_1 H_2^{+1}$ $2H_Y - 0e^- \rightarrow H_2^0$
Кислород (O)	$2n_0$	$n_0 - (0,5n_1 + 0,5n_4 + n_5) = 0$	O_2^0 , H_2O^{-2} , CO^{-2} , CO_2^{-2}	$n_0 O_2^0 + 4n_0 e^- \rightarrow 2n_0 O^{-2}$
Азот (N)	$7,52n_0$	$7,52n_0 = \text{const}$	N_2^0	N_2^0

Таблица 3

Выражения для расчета энергетического баланса процесса (1) в первом приближении

Условие	Выражение для расчета энтальпии
Формула с учетом всех компонентов	$\Delta H_{x.p.n} = [n_1 \Delta H_{H_2(r)} + n_2 \Delta H_{H_2O(r)} + n_3 \Delta H_{C(a)} + n_4 \Delta H_{CO(r)} + n_5 \Delta H_{CO_2(r)}] - [\Delta H_{C_xH_Y(r)} + n_0 \Delta H_{O_2(r)}]$
Элементы с нулевой энтальпией	$\Delta H_{H_2(r)} = \Delta H_{C(a)} = \Delta H_{O_2(r)} = 0$
Результирующее значение	$\Delta H_{x.p.n} = n_2 \Delta H_{H_2O(r)} + n_4 \Delta H_{CO(r)} + n_5 \Delta H_{CO_2(r)} - 1 \Delta H_{C_xH_Y(r)}$

реакции $\Delta H_{x,p}$ от энтальпий образования $\Delta H_{298,f}^0$ всех компонентов: простых и сложных веществ, являющихся реагентами и продуктами реакции. Представляется, что на первом этапе для целей поиска закономерностей применения упрощенных формул может быть достаточно.

В нашем исследовании проверяется гипотеза о том, что пожаро- и взрывоопасность УГС, в том числе особенность формирования ударной волны, зависят от характера зависимости энтальпии процесса $\Delta H_{x,p}$ от энтальпии образования углеводорода, или, иными словами, энергии связей С–Н и С–С в молекуле. На рис. 2 представлены кривые корреляции энтальпии образования $\Delta H_{298,f}^0$ углеводородов C_xH_y [13] от числа атомов углерода X в гомологических рядах: 1 – алканы (предельные углеводороды); 2 – алкены (непредельные углеводороды, этилен-алканы); 3 – циклоалканы (циклические предельные углеводороды); 4 – алкины (ацетилен-алканы). Несмотря на то что представителей других рядов (алкадиенов, изоалканов, изоалкенов) единичные количества, целесообразно обращать внимание на их соответствие выявленным взаимодействиям между энтальпией и структурой.

Для всех соответствующих кривым 1–4 гомологических рядов характер изменения энтальпии аналогичен:

1) плавное, близкое к линейной зависимости снижение величины при возрастании числа углеродных атомов X ;

2) возрастание энтальпии при фиксированной величине X в случае уменьшения показателя изомерии Z (см. табл. 1) в последовательности: алканы $C_xH_{2(x+1)}$ – алкены C_xH_{2x} – циклоалканы C_xH_{2x} – алкины $C_xH_{2(x-1)}$. При этом наиболее близкие между собой значения энтальпий отвечают формуле C_xH_{2x} – алкены и циклоалканы. Характер кривых на рис. 2 свидетельствует о том, максимальная величина выделяемой энтальпии $\Delta H_{x,p}$ отвечает гомологическому ряду алканов (кривая 1) и увеличивается с ростом X . Изменение энтальпии образования $\Delta H_{298,f}^0$ в ряду от метана до бутана составляет: увеличение в 1,68 раза в кДж/моль и снижение в 2,15 удельной величины в кДж/г соответственно. Из чего следует, что термодинамический параметр сам по себе не открывает энергетику и опасность УГС в этом ряду при горении и взрыве. Такие же закономерности характерны и для кривых 2–4.

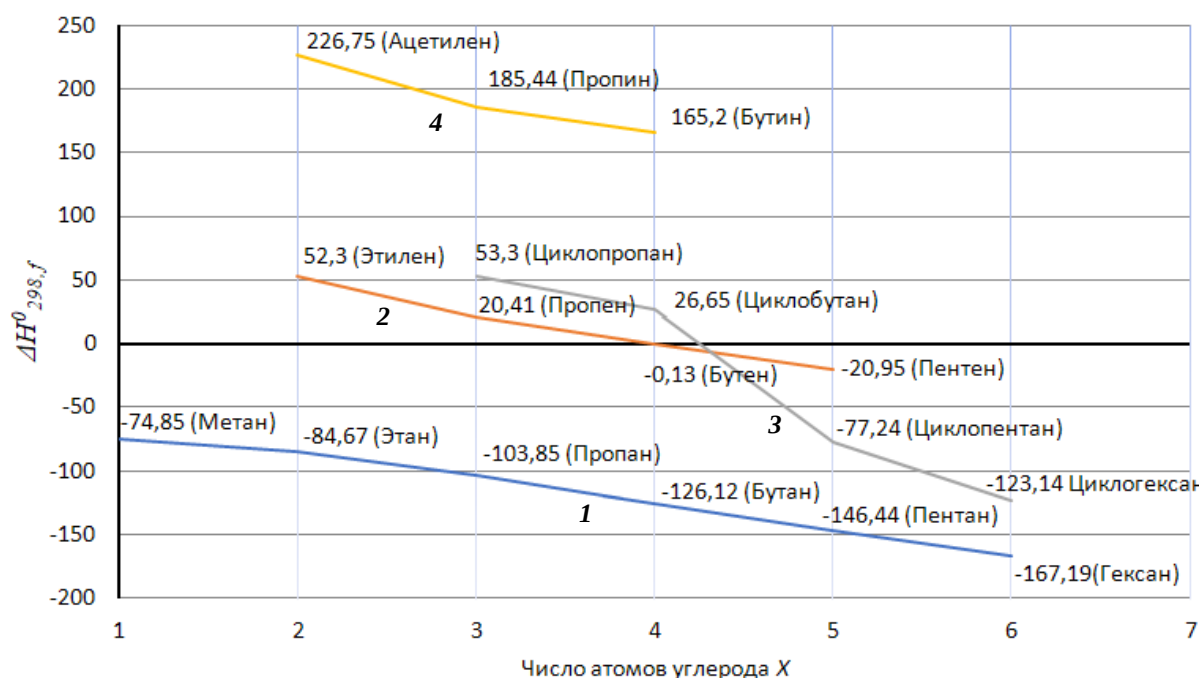


Рис. 2. Корреляция энтальпии образования $\Delta H_{298,f}^0$ углеводородов C_xH_y от числа атомов углерода X в гомологических рядах: 1 – алканы; 2 – алкены; 3 – циклоалканы; 4 – алкины

Характеристикой ударной волны, формируемой взрывными газами, является импульс действия S , зависящий от функции повышения давления во фронте во времени $P(t)$: $S = P(t)\Delta t$. Очевидно, что в газовых системах давление зависит прежде всего от повышения температуры ΔT , но, поскольку это «трудноуловимый» параметр, в модели перспективна оценка по классическим соотношениям, конечно весьма приближительная. Однако такое допущение применяется при «прочих постоянных условиях». Примем, что работа ударной волны $A_{УВ}$ пропорциональна S , зависит от ряда параметров (без учета временного фактора) по соотношению

$$A_{УВ} = F_1(S) = F_2(\Delta P) = F_3(\Delta N, \Delta H_{х.р.в}, C_p, M_m) = K \Delta N \Delta H_{х.р.в}^w C_p^{-1} M_m^{-1}, \quad (3)$$

где F_1, F_2, F_3 – функции зависимости $A_{УВ}$ от параметров УВС при взрыве: от импульса действия, повышения давления ΔP и характеристик взрывных газов соответственно; ΔN – изменение числа молей во взрывном процессе; $\Delta H_{х.р.в}$ – энтальпия взрывного процесса, кДж/моль; w – степень зависимости тепловой и механической энергии взрыва (принимается для простоты $w = 1$); C_p – изобарная теплоемкость газа, Дж/(моль·К); M_m – молекулярная масса газа, г/моль; K – коэффициент, служащий сведению теоретических и экспериментальных значений, моль³·К/(Дж·г).

Предложенное уравнение (3) будет использоваться нами для решения на дальнейших этапах работы следующих задач:

- 1) установление условий и закономерностей образования УВ;
- 2) определение относительной опасности УГС;
- 3) изучение размерного эффекта, т. е. пороговых значений объема и массы УГС, взрыв которого разрушает ВЦ, контейнеры-цистерны и другие объекты транспортной инфраструктуры.

Как уже было отмечено, ввиду очевидной сложности задачи она требует комплексного подхода, теоретических исследований и практической проработки. В практической части внимание следует уделить модели станции и роспуска вагонов с сортировочной горки; системам мониторинга технического состояния

подвижного состава, оборудованного поглощающими аппаратами автосцепок, датчиками соударения, температуры и давления груза; дезактивации и флегматизации УГС; активным и пассивным системам защиты, в том числе отражающим взрывную волну экранам и шумозащитным экранам [17]; квалификации и мотивированности персонала. Ранее проведенная нами оценка [8] ожидаемого экономического эффекта от внедрения одного организационно-технического предложения на внеклассной сортировочной станции составит порядка 2,7 млн р. (в ценах 2016 г.). Предстоит также определить величину снижения рисков развития техногенных чрезвычайных ситуаций на железнодорожном транспорте.

Выводы

1. Рассмотрены основания возврата к проблеме транспортирования и перевозки углеводородных газов – опасных грузов подкласса 2.1 в связи действующим запретом роспуска вагонов с ними и из-под них с сортировочных горок, заметно снижающим перерабатывающую способность и другие технико-экономические показатели работы железнодорожных станций.

2. В рамках намечаемой программы исследований по методу акцидентальной многофакторной компаративистики в качестве первого этапа рассмотрены структурные особенности всех 24 индивидуальных УГС, которым присвоены дискретные номера ООН. Предложены подходы к формированию модели взрыв – горение УГС, нуждающейся в валидации и верификации, теоретическое и практическое значение которой будет раскрываться в последующих работах. Исходя из законодательно закрепленных концепций разумной достаточности и приемлемого риска (менее 10^{-6}) в качестве результата детального исследования свойств перевозимых газов (разделение их на 3–4 группы по степени опасности), совершенствования конструкции вагонов и технологии роспуска можно ожидать поэтапную (3–4 этапа) отмену запрета роспуска на автоматизированных сортировочных горках. Экономия расходов на переработку составов существенно превысит затраты на пилотный проект.

Список источников

1. Железнодорожный транспорт. Погрузка СУГ в ЦС СУГ и ТК СУГ. Сжиженные углеводородные газы. Ежемесячный обзор. Транспорт. 2025. № 1 (1), ноябрь. URL: <https://spimex.com/upload/iblock/a00/9lo3bonp89gy9t6e2nvllins37bnm99q.pdf> (дата обращения: 27.01.2026).
2. ISO 10156:2017. Баллоны газовые. Газы и газовые смеси. Определение потенциальной способности к возгоранию и окислению для выбора выпускного отверстия вентиля баллона // Российский институт стандартизации : РСТ : [сайт]. URL: <https://nd.gostinfo.ru/document/6334948.aspx> (дата обращения: 27.01.2026).
3. Recommendations on the transport of dangerous goods. Model Regulations. Vol. I. Twenty-fourth revised edition. Geneva : United Nations, 2025. 480 p.
4. Правила перевозки опасных грузов : Приложение 2 к Соглашению о международном железнодорожном грузовом сообщении // Министерство транспорта Российской Федерации : [официальный сайт]. URL: <https://www.mintrans.ru/documents/8/4293> (дата обращения: 27.01.2026).
5. Минимальные нормы прикрытия вагонов с опасными грузами при постановке их в поезда и маневрах. Условия роспуска их с сортировочных горок / Совет по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества. Москва : Транспорт, 2001. 262 с.
6. Правила безопасности при перевозке опасных грузов железнодорожным транспортом : утверждены Постановлением Госгортехнадзора РФ от 16.08.1994 № 50 : ред. от 20.06.2002. URL: <https://legalacts.ru/doc/pravila-bezopasnosti-pri-perevozke-opasnykh-gruzov-zheleznodorozhnykh/> (дата обращения: 27.01.2026).
7. Обоснование возможности изменения нормативов роспуска с сортировочных горок вагонов, загруженных опасными грузами / С. В. Карасев, А. А. Климов, В. И. Медведев [и др.] // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2005. № 12. С. 168.
8. Медведев В. И., Тесленко И. О., Казакова А. В. Пересмотр условий роспуска вагонов, загруженных опасными грузами с сортировочных горок // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2016. № 4 (39). С. 5–11.
9. Медведев В. И., Ощепков З. П., Карягин М. Е. К вопросу обеспечения безопасности перевозок сжиженных углеводородных газов в железнодорожных вагонах-цистернах // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения, 2018. № 4 (47). С. 49–57.
10. Тесленко И. О. Совершенствование условий перевозки опасных грузов на железнодорожном транспорте : специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Тесленко Игорь Олегович ; Сибирский государственный университет путей сообщения. Новосибирск, 2002. 20 с.
11. Похилко С. П., Вихровская Л. И. Организация маневровой работы на технических станциях с вагонами, которые запрещено распускать с горки // Сборник научных трудов ДОНИЖТ. 2016. № 43. С. 59–64.
12. Иост В. Взрывы и горение в газах / перевод с немецкого А. Н. Воинова [и др.] ; под редакцией проф. А. В. Фроста. Москва : Издательство иностранной литературы, 1952. 688 с.
13. Корольченко А. Я., Корольченко Д. А. Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник : в 2 ч. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Пожнаука, 2004. URL: <https://ptm01.ru/firecategory/spravochnik/spravochnik.php> (дата обращения: 01.02.2026).
14. Азатян В. В. Законы химической кинетики в процессах горения, взрыва и детонации газов : монография / НИЦ «Курчатовский институт», Научно-исследовательский институт системных исследований РАН. Черноголовка : ФИЦ ПХФ и МХ РАН, 2025. 328 с.
15. Обоснование новой методики прогноза экологических последствий техногенных чрезвычайных ситуаций (пожаров и взрывов) с опасными грузами на железнодорожном транспорте / В. И. Медведев, С. А. Бессоноенко, М. Е. Корягин, М. Д. Сурков // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 3 (70). С. 40–48.
16. Таубкин И. С. Классификация веществ по их способности к взрывчатому превращению // ВИНТИ. Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. 1997. Вып. 11. С. 29–36.
17. Затухание шума на территории жилой застройки вблизи станции И при различных атмосферных состояниях / В. Л. Павлова, Е. А. Калиниченко, И. В. Пирумова, И. А. Селюнин // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 3 (70). С. 40–48.

References

1. Railway transport. Loading of LPG in the LPG Central Storage and LPG Transport Complex. Liquefied hydrocarbon gases. Monthly Review. *Transport*. Issue No. 1 (1) November 2025. (In Russ.). URL: <https://spimex.com/upload/iblock/a00/9lo3bonp89gy9t6e2nvllins37bnm99q.pdf>.

2. ISO 10156:2017 Gas cylinders. Gases and gas mixtures. Determination of fire potential and oxidizing ability for the selection of cylinder valve outlets. Russian Institute of Standardization: RST: [website]. (In Russ.). URL: <https://nd.gostinfo.ru/document/6334948.aspx>.
3. Recommendations on the transport of dangerous goods. Model Regulations. Volume I. Twenty-fourth revised edition. United Nations: Geneva, 2025. 480 p. ST/SG/AC.10/1/Rev.24 (Vol. I).
4. Rules for the transport of dangerous goods. Appendix 2 to the Agreement on International Railway Freight Traffic. Ministry of Transport of the Russian Federation: [official website]. (In Russ.). URL: <https://www.mintrans.ru/documents/8/4293>.
5. Minimum standards for covering wagons with dangerous goods when placing them in trains and during shunting. Conditions for their release from hump yards. *Council for Railway Transport of the CIS Member States*. Moscow: Transport; 2001. 262 p. (In Russ.). URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_00.
6. Safety rules for the transport of dangerous goods by rail. Approved by the Resolution of the State Committee for Industrial and Technical Supervision of the Russian Federation dated 16.08.1994 No. 50: as amended on 20.06.2002). (In Russ.). URL: <https://legalacts.ru/doc/pravila-bezopasnosti-pri-perevozke-opasnykh-gruzov-zheleznodorozhnym/>.
7. Karasev S. V., Klimov A. A., Medvedev V. I. [et al.]. Justification of the possibility of changing the norms for the rolling-out of wagons loaded with hazardous goods from hump yards. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2005. No. 12. P. 168. (In Russ.).
8. Medvedev V. I., Teslenko I. O., Kazakova A. V. Revision of the conditions for rolling out wagons loaded with hazardous goods from hump yards. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2016;(39):5–11. (In Russ.).
9. Medvedev V. I., Oshchepkov Z. P., Karyagin M. E. On the issue of ensuring the safety of transporting liquefied hydrocarbon gases in railway tank cars. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2018;(47):49–57. (In Russ.).
10. Teslenko I. O. Improvement of conditions for the transportation of hazardous cargo by rail: author's abstract of the dissertation ... for the degree of Candidate of Engineering: 05.22.08. Siberian Transport University. Novosibirsk; 2002. 20 p. (In Russ.).
11. Pokhilko S. P., Vikhrovskaya L. I., Organization of shunting operations at technical stations with cars that are prohibited from being sent down the hump. *Proceedings of DONIZhT*. 2016;(43):59–64. (In Russ.).
12. Iost V. Explosions and combustion in gases. Translated from German by A. N. Voinov [et al.]; Edited by Professor A. V. Frost. Moscow: Foreign Literature Publishing House; 1952. 688 p. (In Russ.).
13. Korolchenko A. Ya., Korolchenko D. A. Fire and explosion safety of substances and materials and means of their extinguishing. Handbook: in 2 parts. 2nd edition, revised and expanded. Moscow: Pozhnauka, 2004. (2 parts in one file). (In Russ.). URL: <https://ptm01.ru/firecategory/spravochnik/spravochnik.php>.
14. Azatyan V. V. Laws of chemical kinetics in the processes of combustion, explosion, and detonation of gases: Monograph. Research Center 'Kurchatov Institute', Research Institute of System Research of the Russian Academy of Sciences. Chernogolovka: FIC PFC and MH RAS, 2025. 328 p. (In Russ.).
15. Medvedev V. I., Bessonenko S. A., Koryagin M. E., Surkov M. D. Justification of a new methodology for forecasting the environmental consequences of man-made emergencies (fires and explosions) with dangerous goods on railway transport. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(70):40–48. (In Russ.).
16. Taubkin I. S. Classification of substances by their ability to explode. *VINITI. Problems of Safety in Emergency Situations*. 1997;11:29–36. (In Russ.).
17. Pavlova V. L., Kalinichenko E. A., Pirumova I. V., Selyunin I. A. Noise attenuation in residential areas near the I station under different atmospheric conditions. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(70):40–48. (In Russ.).

Информация об авторах

В. И. Медведев – доктор технических наук, профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Д. В. Ануфриев – аспирант Сибирского государственного университета путей сообщения.

М. Д. Сурков – инженер-конструктор ООО «ПК Дельта».

Information about the authors

V. I. Medvedev – Doctor of Engineering, Professor of the Life Safety Department, Siberian Transport University.

D. V. Anufriev – Postgraduate, Siberian Transport University.

M. D. Surkov – Design Engineer at PK Delta LLC.

Статья поступила в редакцию 31.03.2026; одобрена после рецензирования 30.04.2026; принята к публикации 05.05.2026.

The article was submitted 31.03.2026; approved after reviewing 30.04.2026; accepted for publication 05.05.2026.

Научная статья

УДК 624.151

doi:10.52170/1815-9265_2026_79_70

Мероприятия по развитию железнодорожных магистралей на деградирующих многолетне-мерзлых основаниях Восточного полигона ОАО «РЖД»

Сергей Анатольевич Кудрявцев¹, Татьяна Юрьевна Вальцева^{2✉}, Игорь Ильич Гаврилов³,
Вячеслав Юрьевич Шемякин⁴

^{1, 2, 3, 4} Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия

¹ olgakudr56@mail.ru

² vtu25@mail.ru✉

³ rcdm_gavrilovii@dvvgd.ru

⁴ she727@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрены особенности проектирования и строительства железнодорожных магистралей на деградирующих многолетне-мерзлых грунтах. Проблемы, возникающие при оттаивании многолетне-мерзлых оснований железнодорожных насыпей, приводят к потере устойчивости земляного полотна, появлению дефектов и деформаций железнодорожного пути.

Дальний Восток остается одним из самых значимых и стратегически важных регионов Российской Федерации, имеет большое количество запасов природных ресурсов, но их освоение требует развития инфраструктуры. Именно Дальний Восток стал ключевым направлением для основных потоков экспорта и импорта по магистралям Восточного полигона ОАО «РЖД».

Целью данной статьи является обоснование комплекса мероприятий, реализуемых при проектировании и строительстве железнодорожных магистралей для предотвращения деформации земляного полотна железнодорожных насыпей на деградирующих многолетне-мерзлых грунтах в условиях роста грузооборота и глобального повышения температуры окружающей среды. Проблемы, возникающие при повышении нагрузок и оттаивании многолетне-мерзлых грунтов оснований железнодорожных насыпей, приводят к потере устойчивости земляного полотна, появлению дефектов и деформаций железнодорожного пути. В настоящее время актуальной задачей является стабилизация температурного режима оттаивающих многолетне-мерзлых грунтов в основаниях насыпей железнодорожного пути.

Рассмотрен пример теплотехнического моделирования поперечного профиля железнодорожной насыпи Восточного полигона ОАО «РЖД» с разработкой мероприятий по стабилизации деградации многолетне-мерзлых грунтов основания. Теплотехническое моделирование позволяет оценить состояние существующей конструкции без проведения мероприятий по стабилизации границы многолетне-мерзлых грунтов и с их реализацией, а также спрогнозировать дальнейшее поведение многолетней мерзлоты.

Ключевые слова: сложные инженерно-геологические условия, контрбанкет из скальных грунтов, численное геотехническое моделирование, сезонные охлаждающие устройства, многолетне-мерзлые грунты, деградация мерзлоты, температурный режим грунтов

Для цитирования: Мероприятия по развитию железнодорожных магистралей на деградирующих многолетне-мерзлых основаниях Восточного полигона ОАО «РЖД» / С. А. Кудрявцев, Т. Ю. Вальцева, И. И. Гаврилов, В. Ю. Шемякин // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 2 (79). С. 70–77. DOI 10.52170/1815-9265_2026_79_70.

Original article

Activities for the development of railway lines on degrading permafrost bases of the Eastern polygon of Russian Railways

Sergey A. Kudryavtsev¹, Tatiana Yu. Valtseva^{2✉}, Igor I. Gavrilov³, Vyacheslav Yu. Shemyakin⁴

^{1, 2, 3, 4} Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russian Federation

¹ olgakudr56@mail.ru

² vtu25@mail.ru✉

³ rcdm_gavrilovii@dvvgd.ru

⁴ she727@mail.ru

Abstract. This article examines the design and construction of railway lines on degrading permafrost soils. Problems arising from the thawing of permafrost foundations of railway embankments lead to a loss of roadbed stability, defects, and track deformations.

The Far East remains one of the most significant and strategically important regions of the Russian Federation, boasting abundant natural resources, but their development requires infrastructure development. The Far East has become a key destination for major export and import flows along the Eastern Polygon of Russian Railways.

This article examines thermal modeling of the cross-section of a railway embankment in the Eastern Polygon of Russian Railways, including the development of measures to stabilize the degradation of the permafrost foundation soils. Thermal modeling allows one to assess the condition of the existing structure with and without measures to stabilize the permafrost boundary, as well as to predict the future behavior of permafrost. The purpose of this article is to substantiate a set of measures for the design and construction of railway lines to prevent deformation of the embankment bed on degrading permafrost soils under conditions of increasing freight traffic and global temperature rise. Problems arising from increased loads and thawing of permafrost soils at the foundations of railway embankments lead to a loss of roadbed stability, defects, and deformations in the track. Currently, stabilizing the temperature regime of thawing permafrost soils at the foundations of railway embankments is a pressing issue.

This paper examines options for stabilizing the temperature regime of permafrost soils at the embankment base of the Eastern Polygon of Russian Railways using numerical modeling. Thermal calculations allow us to assess the condition of the existing structure with and without measures to stabilize the permafrost boundary, as well as to predict the future behavior of permafrost.

Keywords: complex engineering and geological conditions, counter-banquet of rocky soils, numerical geotechnical modeling, thermal stabilizers, permafrost, permafrost degradation, soil temperature regime

For citation: Kudryavtsev S. A., Valtseva T. Yu., Gavrilov I. I., Shemyakin V. Yu. Activities for the development of railway lines on degrading permafrost bases of the Eastern polygon of Russian Railways. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(79):70–77. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_79_70.

Введение

В настоящее время особое внимание уделяется развитию железнодорожного транспорта, в частности Восточного полигона ОАО «РЖД». Модернизация и строительство новых железнодорожных магистралей, а также увеличение пропускной способности позволят обеспечить транспортировку растущих объемов грузов, что напрямую связано с реализацией новых инвестиционных проектов и созданием рабочих мест в регионе.

Строительство железных дорог в таких условиях требует учета специфики деградирующих многолетне-мерзлых грунтов основания, которые подвержены пучению, просадкам и деформациям при оттаивании [1]. В связи с этим на Дальнем Востоке при проектировании и строительстве железных дорог, а также других объектов инфраструктуры на многолетне-мерзлых оттаивающих грунтах применяются современные технологии проектирования и строительства, позволяющие минимизировать риски, связанные с нестабильностью оттаивающих грунтовых оснований [2].

Рассматриваемый участок проектирования двухпутной вставки на перегоне Амган – Шугара Дальневосточной железной дороги в административном отношении расположен в Верхнебуреинском районе Хабаровского края, на перегоне Амган – Шугара и обслуживается Этыркэнской дистанцией пути – 27. Ближайшая метеостанция находится в рабочем поселке Чегдомын.

Особенность рассматриваемой территории заключается в наличии многолетне-мерзлых грунтов и их островном и редкоостровном характере [3]. По результатам изысканий многолетне-мерзлые грунты являются высокотемпературными, средняя температура грунтов варьируется от $-0,2^{\circ}\text{C}$ до $-0,9^{\circ}\text{C}$.

Локальное присутствие органического вещества в верхней части разреза, с учетом уплотненного состояния, существенного влияния на прочностные и деформационные показатели свойств грунтов не оказывает; мерзлые неуплотненные грунты при оттаивании приводят к образованию чаш протаивания под телом земляного полотна [4].

При проектировании следует учитывать наличие специфических грунтов и, при необходимости, обеспечить снижение влияния свойств этих грунтов на выбор проектного решения [5, 6], а также солнечную инсоляцию, которая вызывает неравномерное оттаивание конструкции.

В пределах участков развития многолетне-мерзлых грунтов проведены термометрические наблюдения в 33 скважинах. Месторасположение скважин выбиралось таким образом, чтобы можно было получить характеристики температурного режима грунтов [7].

Деграция многолетне-мерзлых грунтов III–IV категории просадочности при оттаивании оказывает существенное влияние на устойчивость земляного полотна с образованием участков мест осадок путей [8].

Материалы и методы исследований

Разработка мероприятий по стабилизации слабого оттаивающего основания при строительстве двухпутной вставки на перегоне Амган – Шугара Дальневосточной железной дороги производится с использованием теплофизического моделирования. Расчетное обоснование с применением геотехнического модуля Termoground, способного в комплексе моделировать работу сооружений по происходящим термодинамическим процессам в годичном цикле промерзания-оттаивания, является наиболее целесообразным.

В основе теплофизического расчета лежит общее уравнение теплопроводности для нестационарного теплового режима, которое характеризует процесс деградации многолетне-мерзлых грунтов следующим образом:

$$C_{th(f)}\rho_d \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_{th(f)} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v, \quad (1)$$

где $C_{th(f)}$ – удельная теплоемкость грунта (талого или мерзлого), Дж/(кг·К); ρ_d – плотность сухого грунта, кг/м³; T – температура, К; t – время, с; $\lambda_{th(f)}$ – теплопроводность грунта (талого или мерзлого), Вт/(м·К); x, y, z – координаты, м; q_v – мощность внутренних источников тепла, Вт/м³.

Данное уравнение определяет величины тепловых потоков, как входящих, так и выходящих из определенного объема грунта. При этом основной поток остается во времени и в точке равным изменению величины циркуляции тепла.

В процессе инженерных изысканий обнаружена неравномерность деградации грунта протяженных железнодорожных насыпей. При изучении данного обстоятельства выявлено, что неравномерное оттаивание зависит от ориентации сооружения относительно стороны горизонта. В связи с этим при численном моделировании, принимая в исходных данных расчетную температуру воздуха в годичном цикле, необходимо учитывать горизонтальную и вертикальную солнечную радиацию, а также испарение для освещенных солнцем поверхностей.

Расчетная температура вычисляется следующим образом:

$$t_{пр} = t + \Delta_{tr} - \Delta_{t\varepsilon}, \quad (2)$$

где t – среднемесячная температура воздуха, определяемая по климатическим нормативным

источникам либо полученная непосредственно с метеорологических станций с учетом ее изменения за счет потепления климата; Δ_{tr} – поправка к среднемесячным температурам воздуха при учете солнечной радиации, °С; $\Delta_{t\varepsilon}$ – поправка к среднемесячным температурам воздуха за счет испарения с освещенных солнцем поверхностей, °С.

Значение Δ_{tr} составляет:

$$\Delta_{tr} = r/\alpha, \quad (3)$$

где r – среднемесячная сумма радиационного баланса для каждого элемента поверхности (определяется по данным, имеющимся в климатологических нормативных источниках), ккал/(м²·мес); α – коэффициент теплообмена на поверхности грунта, ккал/(м·ч·°С).

Указанный выше коэффициент рассчитывается приближенно по формуле

$$\alpha = 10\sqrt{v}, \quad (4)$$

где v – скорость ветра (принимается по климатическим нормативным источникам), м/с.

Значение $\Delta_{t\varepsilon}$ определяется как

$$\Delta_{t\varepsilon} = \Delta_{tr}k, \quad (5)$$

где k – коэффициент, учитывающий характер поверхности, принимаемый в первом приближении равным 0,8 для естественной поверхности и 0,3 – для оголенной.

Для оценки теплофизического состояния конструкции сооружения выполнено прогнозное геотехническое моделирование промерзания-оттаивания конструкции с учетом солнечной радиации [9, 10].

На рис. 1 представлены инженерно-геологические условия исходной конструкции на ПК 31915+00,00 без реализации предлагаемых мероприятий.

Моделирование выполнялось ежемесячно. Расчетная схема приведена на рис. 2.

На рис. 3 показаны зоны промерзания и оттаивания грунта конструкции на октябрь 1-го и 10-го года, а также эпюры температур.

Для предотвращения деградации многолетне-мерзлых грунтов рассмотрен охлаждающий контрбанкет из глыбового грунта. На рис. 4 показаны зоны расположения многолетне-мерзлого грунта в конструкции на октябрь 1-го и 10-го года, а также эпюры температур.

На рис. 5 представлен график изменения границ многолетне-мерзлых грунтов на 10-й год эксплуатации сооружения с применением контрбанкета из скального грунта.

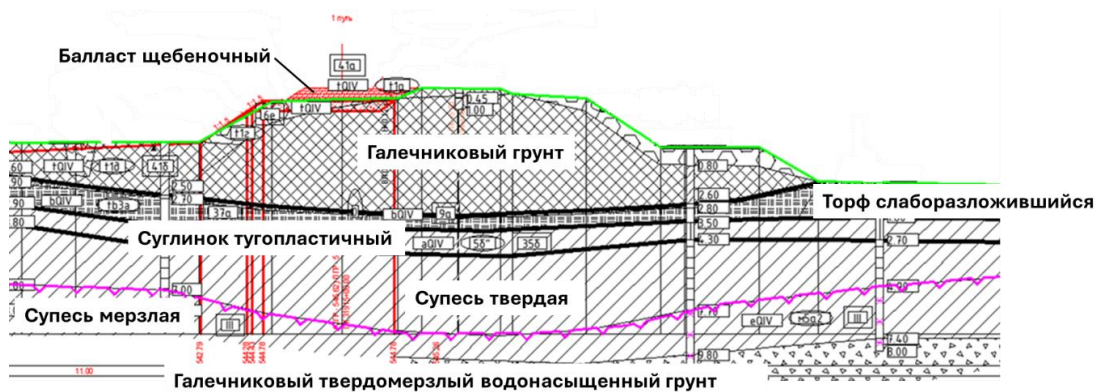


Рис. 1. Инженерно-геологические условия исходной конструкции на ПК 31915+00,00 без мероприятий

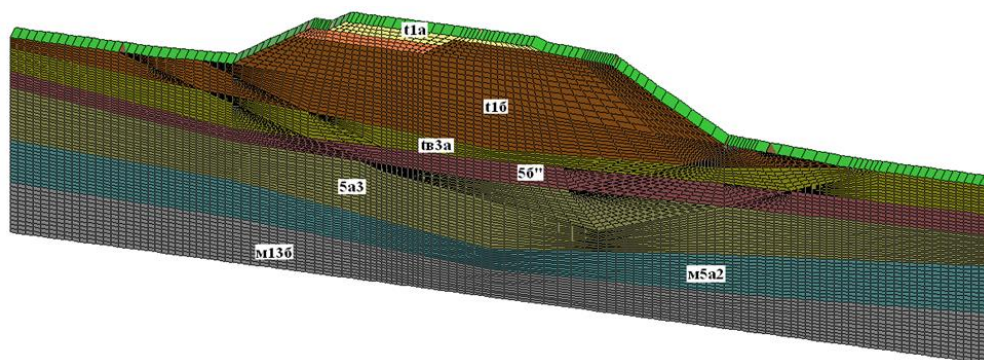


Рис. 2. Расчетная схема конструкции на ПК 31915+00,00:

t1a – насыпной грунт – балласт щебеночный маловлажный; t1b – насыпной грунт – галечниковый грунт с супесчаным заполнителем; тв3а – торф слаборазложившийся маловлажный искусственно погребенный; 5б'' – суглинок тугопластичный заторфованный; 5а3 – супесь твердая дресвяная; мба – супесь дресвяная слабльдистая твердомерзлая незасоленная, слоистой криотекстуры, при оттаивании пластичная, просадочная; m19a – галечниковый грунт твердомерзлый с песчаным заполнителем, при оттаивании водонасыщенный

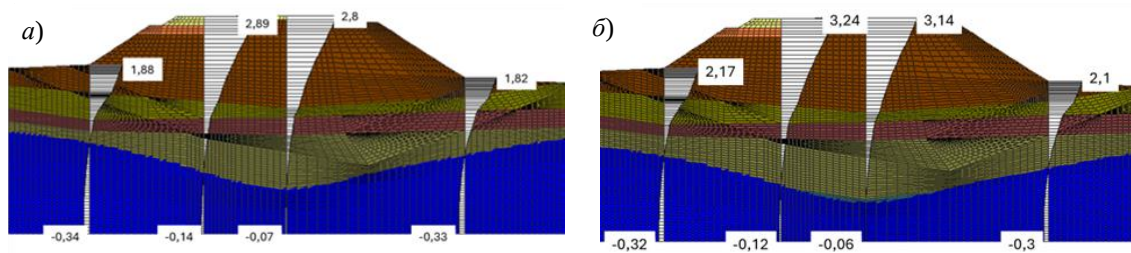


Рис. 3. Зоны расположения многолетне-мерзлого грунта (синий цвет) в конструкции без мероприятий на октябрь 1-го (а) и 10-го (б) года, эпюра температур, °С

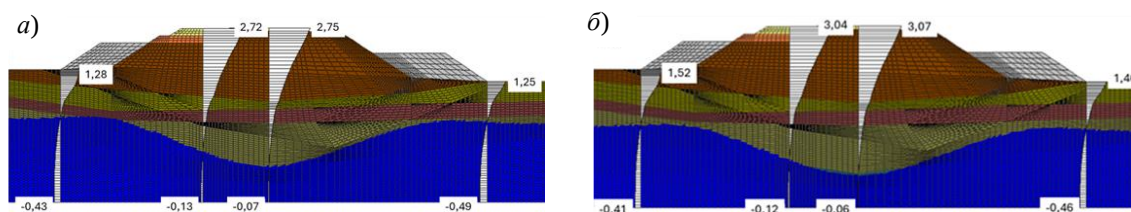


Рис. 4. Зоны расположения многолетне-мерзлого грунта (синий цвет) в конструкции с контрбанкетом на октябрь 1-го (а) и 10-го (б) года, эпюра температур, °С

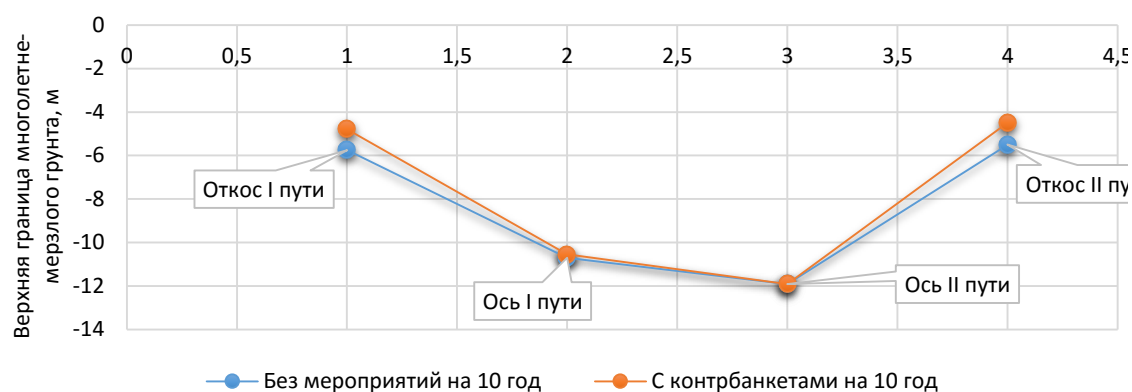


Рис. 5. Изменение границ многолетне-мерзлых грунтов на 10-й год эксплуатации сооружения

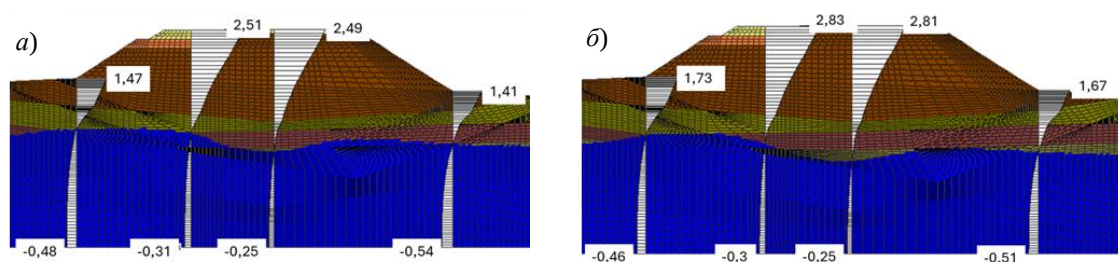


Рис. 6. Зоны расположения многолетне-мерзлого грунта (синий цвет) в конструкции с сезонными охлаждающими устройствами на октябрь 1-го (а) и 10-го (б) года, эпюра температур, °С

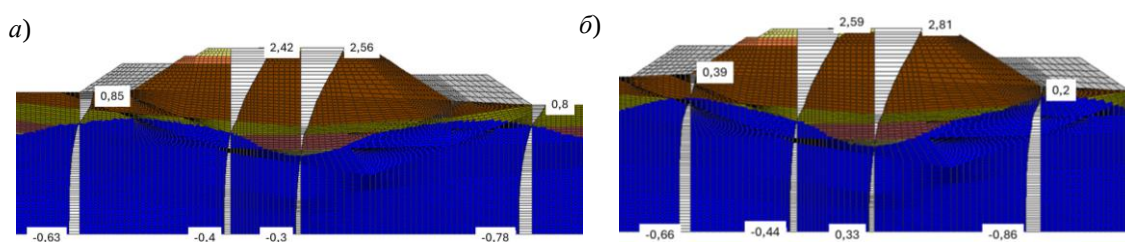


Рис. 7. Зоны расположения многолетне-мерзлого грунта (синий цвет) в конструкции с контрбанкетом и сезонными охлаждающими устройствами на октябрь 1-го (а) и 10-го (б) года, эпюра температур, °С

Для предотвращения дальнейшей деградации рассмотрено применение сезонных охлаждающих устройств [11]. На рис. 6 показаны зоны расположения многолетне-мерзлого грунта в конструкции на октябрь 1-го и 10-го года, а также эпюры температур.

Ввиду сохранения риска дальнейшего развития чаши протаивания рассмотрены комбинированные конструкции, включающие контрбанкет из глыбовых грунтов и сезонные охлаждающие устройства [11]. На рис. 7 показаны зоны расположения многолетне-мерзлого грунта в конструкции на октябрь 1-го и 10-го года, а также эпюры температур.

На рис. 8 представлен график изменения границ многолетне-мерзлых грунтов на 10-й

год эксплуатации сооружения с применением комбинированных мероприятий по стабилизации мерзлоты.

Анализ результатов моделирования конструкции без мероприятий, с контрбанкетом из глыбовых грунтов, с сезонными охлаждающими устройствами и комбинированной конструкции показал понижение верхней границы многолетне-мерзлого грунта, а также повышение температуры грунтов всей конструкции.

Применение контрбанкета из глыбового грунта и сезонных охлаждающих устройств не предотвращает деградацию многолетне-мерзлых грунтов, но замедляет данный процесс.

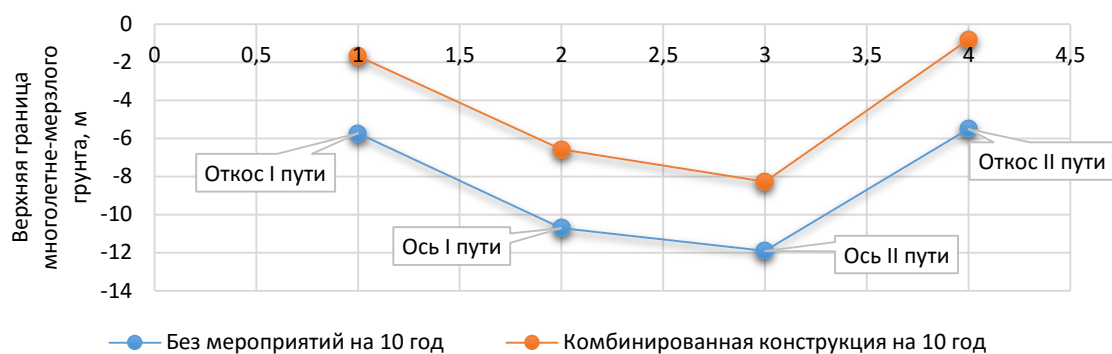


Рис. 8. Изменение границ многолетне-мерзлых грунтов

Мощность талого грунта в различных частях конструкции, м

Мероприятие	Откос I пути	Ось I пути	Ось II пути	Откос II пути
Без мероприятий:				
1-й год	5,19	10,36	11,38	5,16
10-й год	5,74	10,71	11,91	5,50
С контрбанкетом:				
1-й год	4,25	10,19	11,38	3,98
10-й год	4,78	10,54	11,91	4,90
С сезонными охлаждающими устройствами:				
1-й год	3,36	6,77	8,08	3,47
10-й год	3,76	7,43	8,55	3,84
С контрбанкетом и сезонными охлаждающими устройствами:				
1-й год	2,24	6,58	8,27	1,58
10-й год	1,68	6,58	8,27	0,81

Результаты исследования

Полученные результаты численного теплофизического моделирования, представленные в таблице, демонстрируют различное поведение оттаивающих многолетне-мерзлых грунтов при различных вариантах применяемых мероприятий по стабилизации их температурного режима, таких как контрбанкет из скального грунта, сезонные охлаждающие устройства, а также комбинированные конструкции.

В результате моделирования была принята комбинированная конструкция, которая позволяет стабилизировать положение границы многолетне-мерзлого грунта, а также в дальнейшем обеспечить ее поднятие [12].

Выводы

Результаты исследования и расчетное обоснование конструктивных решений по термостабилизации позволили установить необходимость защиты железнодорожной насыпи и основания от повышения температуры грунта. С помощью теплофизических расчетов была спрогнозирована эффективность защиты от деградации многолетне-мерзлых грунтов основания. Верхняя

граница многолетне-мерзлого грунта при реализации комбинированных мероприятий в перспективе за десятилетний период эксплуатации у откоса I пути поднялась на 0,56 м, у откоса II пути – на 0,77 м. В зоне осей пути наблюдается стабилизация верхней границы многолетне-мерзлого грунта. В сравнении с конструкцией без мероприятий, в комбинированной конструкции за десять лет верхняя граница многолетне-мерзлых грунтов у откоса I пути поднялась на 4,06 м, у откоса II пути – на 4,69 м, в зоне оси I пути – на 4,13 м, в зоне II пути – на 3,64 м. Таким образом, при корректном подходе к процессу производства работ по возведению конструкции верхняя граница многолетне-мерзлых грунтов за 10 лет поднимется в среднем на 4,0 м.

Модернизация Восточного полигона ОАО «РЖД» создаст новые возможности для промышленных предприятий, увеличит грузопоток и сократит время в пути. Это, в свою очередь, приведет к росту объемов заказов и созданию новых рабочих мест, а также благоустройству территорий вдоль магистралей, что повысит качество жизни жителей Сибири и Дальнего Востока.

Список источников

1. Кудрявцев С. А., Вальцева Т. Ю., Шемякин В. Ю. Комплексная оценка оснований фундаментов зданий и сооружений на многолетне-мерзлых грунтах Дальнего Востока // *Фундаменты глубокого заложения и проблемы геотехники территорий : материалы III Всероссийской конференции с международным участием*, Пермь, 29–31 мая 2024 г. Пермь : Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2024. С. 82–89. <https://elibrary.ru/flvucp>.
2. Кудрявцев С. А., Сахаров И. И., Парамонов В. Н. Создание условий нормативного состояния деградирующих многолетне-мерзлых оснований зданий и сооружений Дальневосточного федерального округа и Арктики // *Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2021 году : сборник научных трудов РААСН / Российская академия архитектуры и строительных наук*. Москва : АСВ, 2022. Т. 2. С. 157–164. <https://elibrary.ru/ztpvti>.
3. Анизотропия мерзлых грунтов в суровых климатических условиях / А. В. Исаков, Д. А. Красков, А. Ю. Асекритов, О. А. Коробова // *Труды Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин)*. 2024. Т. 27, № 2 (92). С. 55–65. DOI 10.32683/1815-5987-2024-27-92-2-55-65. <https://elibrary.ru/mmmszg>.
4. Чигинцев И. В., Летутин С. Б. Характеристика свойств мерзлых грунтов. Основные способы подготовки грунтов для разработки в зимнее время // *Специальная техника и технологии транспорта*. 2023. № 18. С. 100–105. <https://elibrary.ru/xwshlt>.
5. Расчет осадки оттаивающих многолетне-мерзлых грунтов земляного полотна при действии динамической нагрузки / А. В. Святогорова, И. В. Колос, Д. Р. Кузнецова, Т. Ю. Вальцева // *Бюллетень результатов научных исследований*. 2025. № 3. С. 124–134. DOI 10.20295/2223-9987-2025-3-124-134. <https://elibrary.ru/mxhtrmq>.
6. Рошупкин К. С., Проломова В. В., Кушнерев Н. Ю. К вопросу о строительстве в условиях вечной мерзлоты // *Инновационный потенциал развития общества: взгляд молодых ученых : сборник научных статей 6-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок*, Курск, 01 декабря 2025 г. : в 4 т. Курск : Университетская книга, 2025. С. 380–382. <https://elibrary.ru/qhnopr>.
7. Болдырев Г. Г., Идрисов И. Х. Полевые методы исследования свойств мерзлых грунтов: состояние вопроса. Часть 2. Статическое и динамическое зондирование // *Геотехника*. 2023. Т. 15, № 1. С. 6–21. DOI 10.25296/2221-5514-2023-15-1-6-21. <https://elibrary.ru/vwkbxq>.
8. Знаменский А. С. Мерзлые грунты и строительство // *Стратегическое развитие инновационного потенциала отраслей, комплексов и организаций : сборник статей XI Международной научно-практической конференции*, Пенза, 10–11 октября 2023 г. Пенза : Пензенский государственный аграрный университет, 2023. С. 179–182. <https://elibrary.ru/uynskf>.
9. Кудрявцев С. А., Вальцева Т. Ю. Численное моделирование процессов оттаивания многолетне-мерзлых грунтов инфраструктурных железнодорожных объектов Дальнего Востока // *Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений : тезисы докладов VIII Международного симпозиума*, Тамбов, 17–21 мая 2023 г. Тамбов : ИП Чеснокова А. В., 2023. С. 146–147. <https://elibrary.ru/lpsmgk>.
10. Сахаров И. И., Парамонов В. Н., Парамонов М. В. Современный подход к температурным и деформационным расчетам оснований объектов криолитозоны // *Геотехника*. 2022. Т. 14, № 3. С. 34–43. DOI 10.25296/2221-5514-2022-14-3-34-42. <https://elibrary.ru/gvkruv>.
11. Инженерная защита оснований сооружений термостабилизацией грунта при строительстве в районах вечной мерзлоты / Г. Ю. Тимофеева, П. Е. Демин, И. С. Шатилов, А. В. Косачев // *Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)*. 2022. № 2 (69). С. 71–79. <https://elibrary.ru/uahcdm>.
12. Зацемирная Ю. А., Петрова М. В., Кудрявцев С. А. Геотехнический мониторинг для обеспечения безопасности объектов нового строительства и сохранности существующей застройки // *Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке*. 2022. Т. 1. С. 523–526. <https://elibrary.ru/fbfeud>.

References

1. Kudryavtsev S. A., Valtseva T. Yu., Shemyakin V. Yu. Comprehensive assessment of buildings and structures foundations on permafrost soils of the Far East. *Deep Foundations and Problems of Geotechnical Engineering of Territories. Proceedings of the III All-Russian Conference with International Participation*, Perm, May 29–31, 2024. Perm: Perm National Research Polytechnic University; 2024. P. 82–89. (In Russ.). <https://elibrary.ru/flvucp>.
2. Kudryavtsev S. A., Sakharov I. I., Paramonov V. N. Creation of conditions for the normative state of degrading permafrost foundations of buildings and structures of the Far Eastern Federal District and the Arctic. *Fundamental, Exploratory and Applied Research of RAASN on Scientific Support for the Development of Architecture, Urban Planning and the Construction Industry of the Russian Federation in 2021. Proceedings of RAASN. Russian Academy of Architecture and Construction Sciences*. Volume 2. Moscow: ASV Publishing House; 2022. P. 157–164. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/ztpvti>.

3. Isakov A. V., Kraskov D. A., Asekritov A. Yu., Korobova O. A. Anisotropy of frozen soils under harsh climatic conditions. *Proceedings of the Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)*. 2024;27(92):55–65. DOI 10.32683/1815-5987-2024-27-92-2-55-65. (In Russ.). <https://elibrary.ru/mmmszg>.
4. Chigintsev I. V., Letutin S. B. Characteristics of the properties of frozen soils. Basic methods of preparing soils for development in winter. *Special Equipment and Transport Technologies*. 2023;(18):100–105. (In Russ.). <https://elibrary.ru/xwshlt>.
5. Svyatogorova A. V., Kolos I. V., Kuznetsova D. R., Valtseva T. Yu. Calculation of settlement of thawing permafrost soils of the subgrade under dynamic load. *Bulletin of Scientific Research Results*. 2025;(3):124–134. DOI 10.20295/2223-9987-2025-3-124-134. (In Russ.). <https://elibrary.ru/mxrrmq>.
6. Roshchupkin K. S., Prolomova V. V., Kushnerev N. Yu. On the issue of construction in permafrost conditions. Innovative potential of society development: the view of young scientists. *Proceedings of the 6th All-Russian Scientific Conference of Advanced Developments, Kursk, December 1, 2025*. In 4 volumes. Kursk: University Book; 2025. P. 380–382. (In Russ.). <https://elibrary.ru/qhnopn>.
7. Boldyrev G. G., Idrisov I. Kh. Field methods for studying the properties of frozen soils: state of the art. Part 2. Static and dynamic probing. *Geotechnics*. 2023;15(1):6–21. DOI 10.25296/2221-5514-2023-15-1-6-21. (In Russ.). <https://elibrary.ru/vwkbxq>.
8. Znamensky A. S. Frozen soils and construction. Strategic development of the innovative potential of industries, complexes and organizations. *Proceedings from the XI International Scientific and Practical Conference, Penza, October 10–11, 2023*. Penza: Penza State Agrarian University; 2023. Pp. 179–182. (In Russ.). <https://elibrary.ru/uynskf>.
9. Kudryavtsev S. A., Valtseva T. Yu. Numerical modeling of permafrost thawing processes in railway infrastructure facilities in the Far East. *Actual Problems of Computer Modeling of Structures and Constructions. Abstracts of Reports of the VIII International Symposium, Tambov, May 17–21, 2023*. Tambov: IP Chesnokova A. V.; 2023. P. 146–147. (In Russ.). <https://elibrary.ru/lpsmgk>.
10. Sakharov I. I., Paramonov V. N., Paramonov M. V. Modern approach to temperature and deformation calculations of the foundations of cryolithozone objects. *Geotekhnika*. 2022;14(3):34–43. DOI 10.25296/2221-5514-2022-14-3-34-42. (In Russ.). <https://elibrary.ru/gvkruv>.
11. Timofeeva G. Yu., Demin P. E., Shatilov I. S., Kosachev A. V. Engineering protection of structures foundations by thermal stabilization of soil during construction in permafrost areas. *Bulletin of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)*. 2022;(69):71–79. (In Russ.). <https://elibrary.ru/uahcdm>.
12. Zatsimirnaya Yu. A., Petrova M. V., Kudryavtsev S. A. Geotechnical monitoring to ensure the safety of new construction projects and the preservation of existing buildings. *Scientific, Technical and Economic Cooperation of Asia-Pacific Countries in the 21st Century*. 2022;1:523–526. (In Russ.). <https://elibrary.ru/fbfeud>.

Информация об авторах

С. А. Кудрявцев – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии архитектуры и строительных наук, заведующий кафедрой «Мосты, тоннели и подземные сооружения» Дальневосточного государственного университета путей сообщения.

Т. Ю. Вальцева – доцент кафедры «Мосты, тоннели и подземные сооружения» Дальневосточного государственного университета путей сообщения.

И. И. Гаврилов – аспирант кафедры «Мосты, тоннели и подземные сооружения» Дальневосточного государственного университета путей сообщения.

В. Ю. Шемякин – аспирант кафедры «Мосты, тоннели и подземные сооружения» Дальневосточного государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

S. A. Kudryavtsev – Doctor of Engineering, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Head of the Bridges, Tunnels and Underground Structures Department, Far Eastern State Transport University.

T. Yu. Valtseva – Associate Professor of the Bridges, Tunnels and Underground Structures Department, Far Eastern State Transport University.

I. I. Gavrilov – Postgraduate of the Bridges, Tunnels and Underground Structures Department, Far Eastern State Transport University.

V. Yu. Shemyakin – Postgraduate of the Bridges, Tunnels and Underground Structures Department, Far Eastern State Transport University.

Статья поступила в редакцию 07.05.2026; одобрена после рецензирования 15.05.2026; принята к публикации 21.05.2026.

The article was submitted 07.05.2026; approved after reviewing 15.05.2026; accepted for publication 21.05.2026.

Научная статья
УДК 624.139
doi:10.52170/1815-9265_2026_79_78

Метод проектирования комбинированной термостабилизации основания земляного полотна транспортных сооружений в криолитозоне

Егор Игоревич Нагаев^{1✉}, Денис Алексеевич Разуваев²,

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

¹ einagaev@mail.ru✉

² razdenis@mail.ru

Аннотация. Эксплуатация железнодорожных насыпей в криолитозоне сопровождается деградацией многолетне-мерзлых грунтов основания, развитием термических просадок и деформаций морозного пучения. Традиционные сезонно действующие охлаждающие устройства обладают принципиальным ограничением – длительным временем выхода на проектный режим, в течение которого накапливаются просадки и развиваются деформации морозного пучения в водонасыщенных глинистых грунтах основания. Указанное ограничение обусловлено зависимостью скорости промерзания от коэффициента теплообмена охлаждающего устройства, теплофизических характеристик грунтового массива и климатических условий участка.

Разработан метод проектирования комбинированной термостабилизации основания земляного полотна транспортных сооружений в криолитозоне, включающий активную и пассивную стадию работы, охватывающий полный цикл – от анализа исходных геокриологических данных до обоснования параметров стадий работы охлаждающих устройств. Алгоритм представляет собой замкнутую итерационную процедуру, на каждом этапе которой принятые проектные решения проверяются на соответствие нормативным требованиям по деформациям морозного пучения и долгосрочной термодинамической устойчивости грунтового массива.

Предложен способ расчета деформаций морозного пучения при термостабилизации основания, основанный на эмпирической логарифмической зависимости объемного коэффициента пучения от радиальной скорости промерзания и численном моделировании напряженно-деформированного состояния системы «насыпь – основание».

Введен критерий выбора коэффициента теплообмена пассивной стадии, определяющий допустимый диапазон и обеспечивающий долгосрочное поддержание сформированной зоны отрицательных температур без оттаивания и без развития деформаций морозного пучения сверх предельно допустимого значения с учетом прогнозируемого потепления климата. Предложен подход к определению эквивалентного коэффициента теплообмена комбинированных термостабилизаторов с использованием жидкого азота на основе критерия Нуссельта, позволяющий переносить результаты лабораторных испытаний на натурные объекты с измененными геометрическими параметрами без проведения повторных экспериментов.

Верификация предложенного способа расчета выполнена на опытном полигоне «Семь лиственниц» в Ямало-Ненецком автономном округе. Сопоставление расчетных вертикальных перемещений с натурными данными геокриологического мониторинга показало их количественное согласование, что подтверждает достоверность предложенного способа расчета деформаций морозного пучения при термостабилизации глинистых грунтов охлаждающими устройствами.

Ключевые слова: земляное полотно, многолетне-мерзлые грунты, термостабилизация, сезонно действующие охлаждающие устройства, морозное пучение, коэффициент теплообмена

Для цитирования: Нагаев Е. И., Разуваев Д. А. Метод проектирования комбинированной термостабилизации основания земляного полотна транспортных сооружений в криолитозоне // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 2 (79). С. 78–86. DOI 10.52170/1815-9265_2026_79_78.

Original article

Design method for combined thermal stabilization of the railway roadbed foundation of transport structures in the permafrost zone

Egor I. Nagaev^{1✉}, Denis A. Razuvaev²,

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

¹ einagaev@mail.ru✉

² razdenis@mail.ru

Abstract. The operation of railway roadbeds in permafrost regions is accompanied by degradation of the frozen foundation soils, development of thermal subsidence and frost heave deformations. Traditional seasonally operating cooling devices have a fundamental limitation a long time to reach the design mode, during which subsidence accumulates and frost heave deformations develop in water-saturated clayey foundation soils. This limitation is due to the dependence of the freezing rate on the heat transfer coefficient of the cooling device, thermophysical characteristics of the soil mass, and climatic conditions of the site.

A design method for combined thermal stabilization of the railway roadbed foundation of transport structures in the permafrost zone has been developed, covering the full cycle from analysis of initial geocryological data to justification of the parameters of the active and passive stages of cooling device operation. The algorithm represents a closed iterative procedure, at each stage of which the adopted design decisions are verified against regulatory requirements for frost heave deformations and long-term thermodynamic stability of the soil mass.

A method for calculating frost heave deformations during foundation thermal stabilization has been proposed, based on an empirical logarithmic dependence of the volumetric heave coefficient on the radial freezing rate and numerical modeling of the stress-strain state of the roadbed-foundation system.

A criterion for selecting the heat transfer coefficient of the passive stage has been introduced, defining the permissible range and ensuring long-term maintenance of the formed negative temperature zone without thawing and without development of frost heave deformations beyond the maximum allowable value, accounting for predicted climate warming.

An approach to determining the equivalent heat transfer coefficient of combined thermal stabilizers using liquid nitrogen, based on the Nusselt criterion, has been proposed, enabling the transfer of laboratory test results to full-scale objects with modified geometric parameters without conducting repeated experiments.

Verification of the proposed calculation method was performed at the 'Seven Larches' test site in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. Comparison of the calculated vertical displacements with field geocryological monitoring data demonstrated their quantitative agreement, confirming the reliability of the proposed method for calculating frost heave deformations during thermal stabilization of clayey soils with cooling devices.

Keywords: railway roadbed, permafrost soils, thermal stabilization, seasonally intensive cooling devices, frost heave, heat transfer coefficient

For citation: Nagaev E. I., Razuvaev D. A. Design method for combined thermal stabilization of the railway roadbed foundation of transport structures in the permafrost zone. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(79):78–86. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_79_78.

Введение

Термостабилизация многолетне-мерзлых грунтов (ММГ) основания земляного полотна железных дорог в криолитозоне является задачей, решение которой определяет эксплуатационную надежность и безопасность транспортных сооружений. В условиях наблюдаемого потепления климата [1, 2], при котором среднегодовая температура воздуха в арктических районах возрастает со скоростью до 0,07 °C в год, деградация ММГ приобретает устойчивый и нарастающий характер, что обуславливает развитие неравномерных осадок, потерю устойчивости откосов насыпи и расстройство железнодорожного пути.

Наиболее распространенным методом термостабилизации грунтов оснований транспортных сооружений являются сезонно действующие охлаждающие устройства (СОУ) [3, 4], функционирующие по принципу теплового диода за счет парорефрижераторного цикла хладагента. Вместе с тем практика эксплуатации железных дорог в криолитозоне показывает, что традиционные СОУ обладают принципиальным ограничением [5]. Время выхода системы на проектный температурный режим составляет, как правило, от одного года до нескольких лет, в зависимости от коэффициента теплообмена

устройства и геокриологических условий участка [6]. В этот период накапливаются термические просадки, снижение несущей способности оттаявших глинистых грунтов создает угрозу потери общей устойчивости насыпи, а промерзание водонасыщенных глинистых грунтов в зоне влияния охлаждающих устройств сопровождается развитием деформаций морозного пучения.

Помимо этого, процесс промерзания водонасыщенных глинистых грунтов в зоне влияния охлаждающих устройств сопровождается развитием деформаций морозного пучения [7–9]. Неравномерный подъем основной площадки земляного полотна вызывает расстройство рельсовой колеи и требует проведения регулярных выправочно-подбивочных работ.

Для устранения указанных недостатков разработан комбинированный способ термостабилизации [10], основанный на реализации принципов теплового трансформатора и теплового диода в единой технологической последовательности. Способ предусматривает два последовательных этапа: активное замораживание грунтового массива с использованием жидкого азота, обеспечивающее оперативное формирование устойчивой зоны отрицательных температур заданного радиуса за минимально

возможное время, и последующий переход в пассивный режим поддержания мерзлого состояния грунтов по принципу парожидкостного СОУ без затрат внешней энергии.

Практическая реализация комбинированного способа требует научно обоснованного метода проектирования, учитывающего взаимосвязь между параметрами охлаждающих устройств, скоростью промерзания, интенсивностью морозного пучения и деформациями основной площадки земляного полотна.

Целью настоящей статьи является разработка алгоритма проектирования комбинированной термостабилизации основания земляного полотна, включающего расчет деформаций морозного пучения, обоснование параметров пассивного режима работы охлаждающих устройств и определение эквивалентного коэффициента теплообмена при использовании жидкого азота.

Методы исследования

Разработанный метод проектирования представлен в виде алгоритма последовательно связанных действий и условий выбора проектных решений (рис. 1), охватывающего полный цикл – от анализа исходных данных до окончания стабилизации. Алгоритм дополняет действующие нормативные документы в области строительства транспортных сооружений в криолитозоне.

Процесс проектирования начинается с анализа исходных данных и формирования расчетных моделей, включающих литологический состав и состояние грунтов, глубину залегания ММГ, уровень грунтовых вод, климатические характеристики региона, а также конструктивные особенности земляного полотна. На основе сформированных моделей выполняются расчеты коэффициента устойчивости откосов насыпи $K_{уст}$ и термической просадки S_{th} . Полученные значения сопоставляются с нормативными требованиями: коэффициент устойчивости оценивается в соответствии требованиями [11], а предельные значения термической просадки – согласно нормативным документам для железнодорожных линий соответствующего класса [12].

Если оба условия выполнены, т. е. $K_{уст}$ превышает нормативное значение, а прогнозируемая термическая просадка S_{th} не превышает допустимых пределов, участок признается

стабильным и переводится в режим периодических наблюдений. В случае, когда прогнозируемая термическая просадка превышает нормативный порог при удовлетворительном коэффициенте устойчивости, принимается решение о сохранении положения кровли ММГ традиционными способами в соответствии с действующими нормативными методиками. Если же коэффициент устойчивости оказывается ниже нормативного уровня вне зависимости от текущего значения просадки, принимается решение о восстановлении границы ММГ до исходного положения и выше.

На этапе проектирования восстановления границы ММГ прежде всего устанавливается требуемое время термостабилизации T , определяемое исходя из сроков проведения ремонтных работ. По зависимостям, установленным в ходе численного моделирования [13], для заданного времени T определяется требуемый коэффициент теплообмена $\alpha_{пр}$ охлаждающих устройств. По результатам теплового моделирования устанавливается требуемый радиус промерзания R_{fr} , а радиальная скорость промерзания V_{fr} определяется из соотношения требуемого радиуса промерзания и заданного времени термостабилизации T .

Далее проводится оценка деформаций морозного пучения, возникающих в процессе термостабилизации водонасыщенных глинистых грунтов основания. Для этого используется эмпирическая зависимость, полученная в ходе масштабного лабораторного эксперимента [7], описывающая связь объемного коэффициента морозного пучения ξ_v с радиальной скоростью промерзания V_{fr} логарифмической функцией.

Полученное значение объемного коэффициента пучения служит исходным параметром для геотехнического моделирования НДС системы «насыпь – основание». В зоне промерзания задается принудительное увеличение объема, пропорциональное установленному коэффициенту ξ_v , после чего численным методом конечных элементов определяется прогнозируемая величина вертикального подъема $h_{пуч}$ на основной площадке земляного полотна.

При многорядной установке СОУ в водонасыщенных глинистых грунтах основания земляного полотна промораживаемый грунт объемом Q_{fr} стремится к увеличению объема $Q_{пуч}$. По крайним рядам охлаждающих устройств часть объемного расширения может быть частично

скомпенсирована горизонтальным выдавливанием грунта в стороны. Однако в центральной зоне, непосредственно под основной площадкой, боковое смещение грунта ограничено, вследствие чего объемное увеличение реализуется

преимущественно в виде направленного вертикального подъема поверхности. Принципиальная схема, иллюстрирующая пространственное распределение зоны промерзания и характер реализации деформаций, представлена на рис. 2.

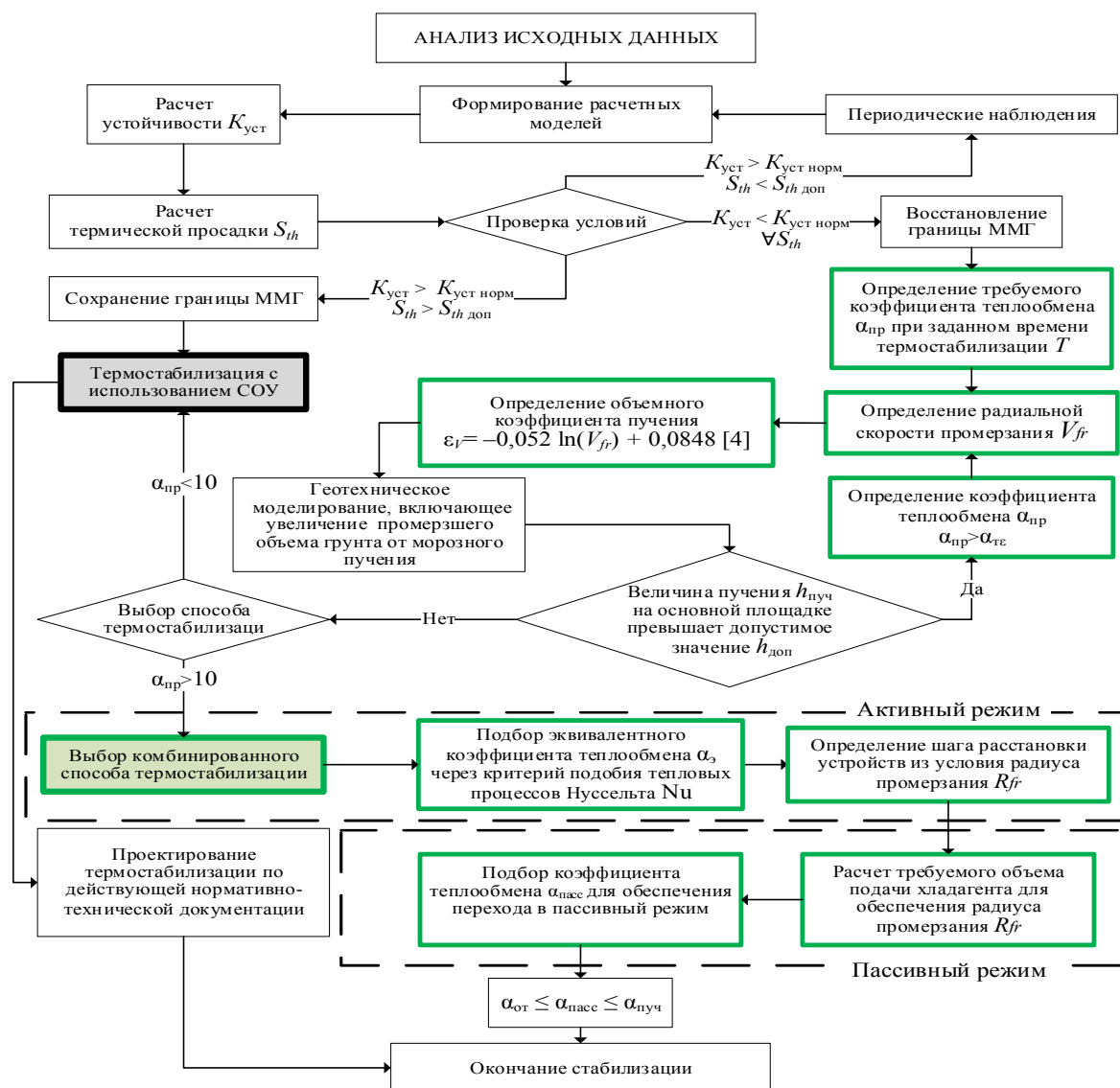


Рис. 1. Алгоритм проектирования комбинированного способа

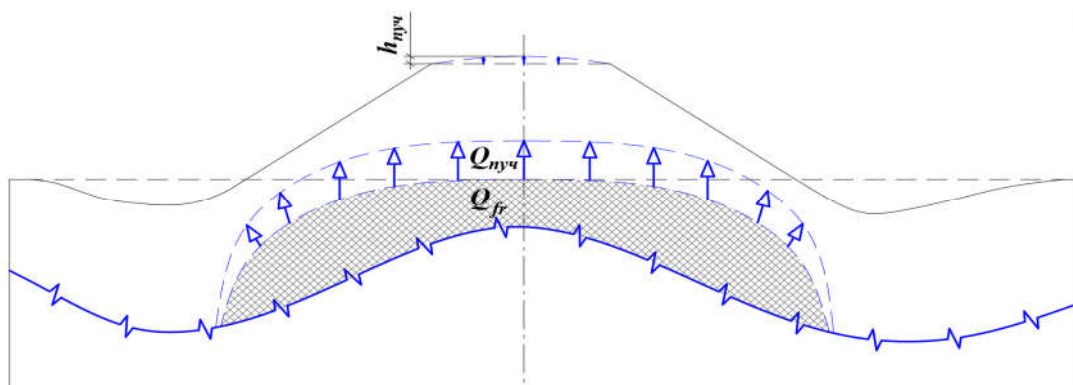


Рис. 2. Принципиальная схема для определения вертикального подъема $h_{пуч}$ на основной площадке

Для количественной оценки вертикального подъема $h_{\text{пуч}}$ на основной площадке выполняется расчет НДС системы «насыпь – основание» методом конечных элементов. Исходными данными для расчета служат геометрия зоны промерзания, полученная по результатам теплового моделирования, физико-механические характеристики грунтов, установленные в ходе инженерно-геологических изысканий, а также значение объемного коэффициента морозного пучения ξ_V , определенное по эмпирической зависимости, приведенной в работе [7]. В зоне промерзания задается принудительное увеличение объема согласно коэффициенту ξ_V . Узлы конечных элементов, ограничивающие промерзшую область, смещаются таким образом, чтобы суммарный объем этой области увеличился на величину, соответствующую расчетному пучению. При этом нижняя граница зоны промерзания принимается неподвижной, вертикальные компоненты перемещений преобладают в центральной части под осью пути, а на периферии у крайних рядов устройств допускаются небольшие горизонтальные составляющие.

Полученное расчетное значение $h_{\text{пуч}}$ сопоставляется с нормой порогового значения для основной площадки согласно [12]. Если прогнозируемый подъем не превышает нормативного значения, выполняется выбор способа термостабилизации в зависимости от величины требуемого коэффициента теплообмена.

При $\alpha_{\text{пр}} < 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ принимается решение о проектировании традиционных СОУ, при $\alpha_{\text{пр}} > 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ – о применении комбинированного способа, основанное на результатах исследования влияния коэффициента теплообмена [13]. При превышении $h_{\text{доп}}$ выполняется итерационный подбор $\alpha_{\text{пр}}$ в сторону увеличения, что соответствует повышению радиальной скорости промерзания $V_{\text{пр}}$ и снижению объемного коэффициента пучения ξ_V .

При выборе комбинированного способа термостабилизации для подбора эквивалентного коэффициента теплообмена α_3 системы с жидким азотом предлагается применять нетрадиционный подход, основанный на теории подобия с использованием критерия Нуссельта, вычисляемого по формуле (1). Данный подход позволяет перенести результаты лабораторных испытаний [7, 10] на натурные объекты с измененными геометрическими пара-

метрами без проведения серии повторных экспериментов.

$$\text{Nu} = \frac{\alpha d}{\lambda}, \quad (1)$$

где α – коэффициент теплообмена, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; d – диаметр охлаждающего устройства, м; λ – коэффициент теплопроводности.

Принципиальное различие между СОУ и системой с жидким азотом состоит в определяющем механизме теплопереноса. Для СОУ им является внешний конвективный теплообмен конденсатора с атмосферным воздухом, тогда как для системы с жидким азотом это интенсивное фазовое превращение хладагента внутри устройства. По экспериментально установленным коэффициентам теплообмена $\alpha_{\text{СОУ}} = 3,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и $\alpha_{\text{азот}} = 46 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ [10] для устройства диаметром $d = 0,038 \text{ м}$ вычислены соответствующие числа Нуссельта: $\text{Nu}_{\text{СОУ}} = 5,45$ и $\text{Nu}_{\text{азот}} = 12,76$. Их отношение представляет собой эмпирический коэффициент интенсификации относительного преимущества системы с жидким азотом в интенсивности теплопереноса:

$$R_{\text{Nu}} = \frac{\text{Nu}_{\text{азот}}}{\text{Nu}_{\text{СОУ}}}. \quad (2)$$

Тогда для проектного устройства с диаметром d_n и коэффициентом теплообмена $\alpha_{\text{СОУ } n}$ эквивалентный коэффициент теплообмена системы с жидким азотом определяется как

$$\alpha_3 = \frac{R_{\text{Nu}} \text{Nu}_{\text{СОУ } n} \lambda_{\text{азот}}}{d_n}. \quad (3)$$

При практическом применении формулы (3) следует учитывать, что теплопроводность жидкого азота $\lambda_{\text{азот}}$ варьируется в зависимости от степени чистоты хладагента, а в случае, когда активная и пассивная стадии реализуются устройствами разного диаметра, в расчет подставляются соответствующие значения. Например, для проектного устройства с $d_{\text{СОУ}} = 0,05 \text{ м}$, $\alpha_{\text{СОУ } n} = 5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и $d_{\text{азот}} = 0,05 \text{ м}$ при $\lambda_{\text{азот}} = 0,137 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ число Нуссельта составляет $\text{Nu}_{\text{СОУ } n} = 10,87$, а эквивалентный коэффициент теплообмена $\alpha_3 = 69,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Расчетный объем подаваемого хладагента на активной стадии устанавливается теплотехническим расчетом с учетом выявленного в ходе лабораторного эксперимента [10] эффекта инерционного промерзания, т. е. продолжения роста зоны отрицательных температур после прекращения подачи жидкого азота

за счет выравнивания температурного градиента между мерзлой и талой зонами.

После завершения активной стадии замораживания и достижения грунтовым массивом целевого температурного состояния система переводится в пассивный режим поддержания мерзлого состояния грунтов, функционирующий по принципу парожидкостного охлаждающего устройства. Задачей на данном этапе является подбор коэффициента теплообмена пассивной стадии $\alpha_{\text{пасс}}$, обеспечивающего долгосрочную термодинамическую устойчивость грунтового массива. Требования к $\alpha_{\text{пасс}}$ определяются двумя условиями: при значении ниже минимального коэффициента теплообмена $\alpha_{\text{от}}$ начинается оттаивание сформированной зоны отрицательных температур, тогда как при значении выше максимального коэффициента теплообмена $\alpha_{\text{пуч}}$, соответствующего предельно допустимому значению морозного пучения, избыточная интенсивность теплоотвода в холодный период года будет приводить к развитию деформаций морозного пучения. Оба граничных значения определяются с учетом прогнозируемого потепления климата на расчетный период, а $\alpha_{\text{пасс}}$ подбирается из условия

$$\alpha_{\text{от}} < \alpha_{\text{пасс}} < \alpha_{\text{пуч}}.$$

Таким образом, коэффициент $\alpha_{\text{пасс}}$ должен находиться в диапазоне, при котором среднегодовая температура грунта на границе ММГ остается стабильно отрицательной, но не опускается ниже значений, при которых возможно промерзание основания и интенсивность пучения превышает допустимую.

Разработанный алгоритм проектирования комбинированной термостабилизации представляет собой замкнутую итерационную процедуру, на каждом этапе которой принятые проектные решения проверяются на соответствие нормативным требованиям как по деформациям морозного пучения, так и по долгосрочной термодинамической устойчивости грунтового массива.

Верификация деформаций морозного пучения при термостабилизации

Для подтверждения достоверности предложенного способа расчета были проведены натурные наблюдения на опытном полигоне «Семь лиственниц», расположенном в Ямало-Ненецком автономном округе [14]. Выбор пло-

щадки обусловлен характерными для криолитозоны геокриологическими условиями.

Размещение охлаждающих устройств и организация натурных наблюдений выполнены в соответствии с программой, описанной в работах [14]. Измерения вертикальных перемещений производились геометрическим нивелированием с привязкой к постоянному реперу, расположенному за пределами зоны влияния термостабилизации.

График наблюдений:

0-й цикл	09.2024
1-й цикл	11.2024
2-й цикл	12.2024
3-й цикл	01.2025
4-й цикл	03.2025
5-й цикл	05.2025
6-й цикл	07.2025
7-й цикл	08.2025
8-й цикл	09.2025
9-й цикл	01.2026
10-й цикл	03.2026

Процесс проведения измерений представлен на рис. 3.

Результаты натурных наблюдений показали устойчивую положительную динамику вертикальных перемещений грунтовых марок в холодный период года, соответствующую развитию морозного пучения в зоне влияния охлаждающих устройств.

Для верификации способа расчета выполнено численное моделирование НДС системы «насыпь – основание» методом конечных элементов с использованием геометрии зоны промерзания, физико-механических характеристик грунтов и значения объемного коэффициента морозного пучения ξ_v . Результаты расчета вертикальных перемещений представлены на рис. 4.

Максимальный вертикальный подъем поверхности в зоне расположения грунтовых марок, полученный по результатам численного моделирования НДС, качественно и количественно согласуется с натурными данными геокриологического мониторинга полигона, что подтверждает применимость предложенного способа расчета для прогнозирования деформаций морозного пучения при термостабилизации глинистых грунтов охлаждающими устройствами.

а)



б)



Рис. 3. Этапы измерений:
а – геодезических; б – температурных

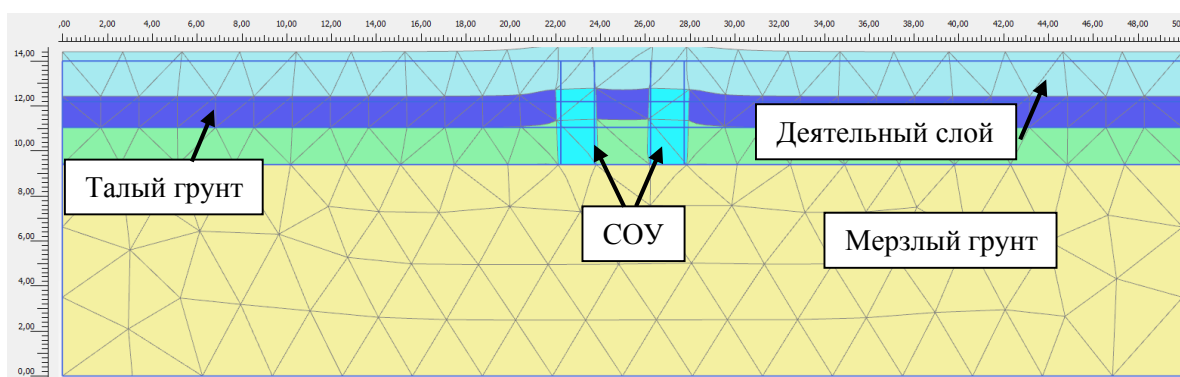


Рис. 4. Деформированный вид участка исследования

Выводы

По результатам исследований разработан метод проектирования комбинированной термостабилизации основания земляного полотна транспортных сооружений в криолитозоне, включающий обоснование параметров активной и пассивной стадий, способ расчета деформаций морозного пучения при термостабилизации основания, который базируется на эмпирической зависимости объемного коэффициента пучения от радиальной скорости промерзания и численного моделирования НДС системы «насыпь – основание», а также подход к определению эквивалентного коэффициента теплообмена α , комбинированных термостабилизаторов с использованием жидкого азота.

Предложен новый критерий выбора коэффициента теплообмена пассивной стадии $\alpha_{\text{пасс}}$ комбинированного охлаждающего устройства, определяющий допустимый диапазон

$\alpha_{\text{от}} < \alpha_{\text{пасс}} < \alpha_{\text{пуч}}$ и обеспечивающий долгосрочное поддержание сформированной зоны отрицательных температур без оттаивания и без развития деформаций морозного пучения сверх предельно допустимого значения с учетом прогнозируемого потепления климата.

Выполнена верификация способа расчета деформаций морозного пучения при термостабилизации на опытном полигоне «Семь лиственниц» в Ямало-Ненецком автономном округе, показавшая качественное и количественное согласование расчетных вертикальных перемещений с натурными данными геокриологического мониторинга.

Направление дальнейших исследований связано с экспериментальным подтверждением применимости предложенного подхода к определению эквивалентного коэффициента теплообмена α для комбинированных термостабилизаторов с геометрическими параметрами, отличными от использованных в базовом эксперименте.

Список источников

1. Хрусталева Л. Н., Пармузин С. Ю., Емельянова Л. В. Надежность северной инфраструктуры в условиях меняющегося климата / Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Геологический факультет. Москва : Университетская книга, 2011. 259 с.
2. Ревин Б. А., Харьковская Т. Л. Климатические риски социального развития Ямало-Ненецкого автономного округа // Проблемы прогнозирования. 2023. № 4 (199). С. 157–167. DOI 10.47711/0868-6351-199-157-167. EDN ZDMOKM.
3. Ашпиз Е. С., Хрусталева Л. Н. Предотвращение деградации многолетне-мерзлых грунтов в основании насыпей железных дорог // Криосфера Земли. 2020. Т. 24, № 5. С. 45–50.
4. 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.
5. Евдокимов В. С., Максименко В. А., Николаев В. С. Исследование работы комбинированного сезонно-действующего охлаждающего устройства // Омский научный вестник. 2015. № 1 (137). С. 73–76. EDN UCDJZP.
6. Паздерин Д. С. Расчет теплообмена при проектировании конденсаторной части одиночного сезонно-действующего охлаждающего устройства // Сборник тезисов Тюменского международного инновационного форума «НефтьГазТЭК-2013». Тюмень, 2013.
7. 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 UUIBGZ.
8. 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. Москва, 2021. 150 с.
9. 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.
10. Комбинированный способ восстановления мерзлого состояния грунтов в теле и основании земляного полотна / Е. С. Ашпиз, Е. И. Нагаев, Д. А. Разуваев, А. О. Салмин // Криосфера Земли. 2026. Т. 30, № 1. С. 37–44. DOI 10.15372/KZ20260104. EDN ENCOYG.
11. СП 119.13330.2024. Железные дороги колеи 1520 мм. Москва, 2024. 231 с.
12. Об утверждении Классификатора и норм пороговых значений критических параметров, характеризующих предотказное состояние земляного полотна : распоряжение ОАО «РЖД» от 14 апреля 2016 года № 660р. Москва, 2016.
13. 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. EDN BCERSD.
14. Ашпиз Е. С., Разуваев Д. А. Организация полевого эксперимента по охлаждению многолетне-мерзлых грунтов основания сезонно-действующими установками в условиях полуострова Ямал // Проектирование, строительство и эксплуатация объектов транспортной инфраструктуры в сложных климатических и инженерно-геологических условиях : материалы Международной научно-практической конференции, 24–26 октября 2024 г. / Российский университет транспорта. Москва : Дашков и К, 2024. С. 22–24. EDN CWIRGP.

References

1. Khustalev L. N., Parmuzin S. Yu., Emelyanova L. V. Reliability of northern infrastructure in a changing climate. Lomonosov Moscow State University, Geological Faculty. Moscow: Universitetskaya Kniga; 2011. 259 p. (In Russ.).
2. Revin B. A., Kharkovskaya T. L. Climatic risks of social development in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. *Problems of Forecasting*. 2023;(199):157–167. (In Russ.). DOI 10.47711/0868-6351-199-157-167.
3. Ashpiz E. S., Khustalev L. N. Prevention of permafrost degradation in railway roadbed foundations. *Cryosphere of the Earth*. 2020;24(5):45–50. (In Russ.).
4. Tsernant A. A. Innovative Technologies for temperature control of soil masses of transport structures in arctic latitudes. *Construction Materials, Equipment, Technologies of the XXI Century*. 2013;(3):26–31. (In Russ.).
5. Evdokimov V. S., Maksimenko V. A., Nikolaev V. S. Study of the operation of a combined seasonally operating cooling device. *Omsk Scientific Bulletin*. 2015;(137):73–76. (In Russ.).

6. Pazderin D. S. Calculation of heat exchange in the design of the condenser part of a single seasonally operating cooling device. *Proceedings of the Tyumen International Innovation Forum 'NefteGasTEK-2013'*. Tyumen, 2013. (In Russ.).
7. Razuvaev D. A., Ashpiz E. S., Nagaev E. I. Results of large-scale modeling of soil frost heave during thermostabilization with seasonally operating cooling devices. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(75):32–41. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_75_32.
8. Ibragimov E. V. Optimization of foundation and substructure arrangement in the cryolithozone using soil thermostabilization. Specialty 05.23.02 'Foundations and foundations, underground structures'. Dissertation for the Degree of Candidate of Engineering. Ibragimov Enver Valerievich, 2021. 150 p. (In Russ.).
9. Bayasan R. M., Golubin S. I., Avramov A. V. Features of applying thermostabilization technology for protection against soil frost heave. *Engineering Surveys*. 2015;(12):56–62. (In Russ.).
10. Ashpiz E. S., Nagaev E. I., Razuvaev D. A., Salmin A. O. Combined method for restoring the frozen state of soils in the body and foundation of the roadbed. *Cryosphere of the Earth*. 2026;30(1):37–44. (In Russ.). DOI 10.15372/KZ20260104.
11. SP 119.13330.2024. Railways of 1520 mm gauge. Moscow, 2024. 231 p. (In Russ.).
12. Order No. 660r of April 14, 2016 'On approval of the classifier and norms of threshold values of critical parameters characterizing the pre-failure state of the roadbed'. (In Russ.).
13. Razuvaev D. A., Nagaev E. I. Influence of the heat transfer coefficient of cooling devices on the thermostabilization of the roadbed foundation of transport structures. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(78):56–65. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_78_56.
14. Ashpiz E. S., Razuvaev D. A. Organization of field experiment on cooling permafrost soils of the foundation with seasonally operating units in the Yamal peninsula conditions. *Design, Construction and Operation of Transport Infrastructure Facilities in Complex Climatic and Engineering-Geological Conditions: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Russian University of Transport, October 24–26, 2024*. Moscow: Dashkov & K Publishing and Trading Corporation, 2024. P. 22–24. (In Russ.).

Информация об авторах

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

Д. А. Разуваев – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Изыскания, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

E. I. Nagaev – Lecturer of the Track and Track Facility Department, Siberian Transport University.

D. A. Razuvaev – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Surveying, Designing and Construction of Railways and Highways Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 15.05.2026; одобрена после рецензирования 22.05.2026; принята к публикации 26.05.2026.

The article was submitted 15.05.2026; approved after reviewing 22.05.2026; accepted for publication 26.05.2026.

Научная статья
УДК 004.023
doi:10.52170/1815-9265_2026_79_87

Динамический мультиагентный подход для решения задачи циклической маршрутизации

Валерий Иванович Хабаров^{1✉}, Владислав Евгеньевич Квашнин²

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

¹ Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

¹ khabarov51@mail.ru✉

² gyro105@yandex.ru

Аннотация. Настоящая статья посвящена исследованию мультиагентной задачи коммивояжера с общим депо и динамическим распределением точек обслуживания. В отличие от традиционных подходов, предполагающих предварительную кластеризацию множества и жесткое закрепление точек за агентами, предлагаемый метод обеспечивает адаптивное формирование зон обслуживания непосредственно в ходе конструирования маршрутов. Принцип распределения основан на последовательной минимизации длины циклических маршрутов для каждого агента, выходящего из своей стартовой точки (т. е. депо), что обуславливает образование пространственно обособленных и компактных кластеров. Маршрутизация внутри формируемых подмножеств осуществляется с использованием модифицированного муравьиного алгоритма, в котором переходная вероятность учитывает, наряду с интенсивностью феромонового следа и информацией, обратно пропорциональной расстоянию, дополнительный корректирующий множитель, отражающий близость кандидата к стартовой вершине. Данная архитектура позволяет решать задачи кластеризации и маршрутизации согласованно в рамках единого оптимизационного процесса, исключая необходимость этапа предварительного разбиения. Реализована многопоточная обработка формируемых кластеров, обеспечивающая масштабируемость алгоритма при росте числа агентов. Результаты вычислительных экспериментов на стандартных тестовых наборах различной размерности подтверждают эффективность предложенного подхода по критерию минимизации суммарной длины маршрутов. Установлено, что интеграция фактора близости к начальной позиции в эвристическую функцию способствует формированию более компактных траекторий по сравнению с базовой версией муравьиного алгоритма. При сопоставимых вычислительных издержках динамическая схема распределения обеспечивает улучшение целевой функции в среднем на 6 %, а также повышает адаптивность системы к динамическим изменениям входных параметров.

Ключевые слова: мультиагентная система, задача многих коммивояжеров, динамическая маршрутизация, алгоритм муравьиной колонии, распределение точек, гамильтонов цикл, транспортная логистика, адаптивные эвристики

Для цитирования: Хабаров В. И., Квашнин В. Е. Динамический мультиагентный подход для решения задачи циклической маршрутизации // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 2 (79). С. 87–94. DOI 10.52170/1815-9265_2026_79_87.

Original article

The dynamic multi-agent approach to solving the traveling salesman problem

Valery I. Khabarov^{1✉}, Vladislav E. Kvashnin²

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

¹ Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

¹ khabarov51@mail.ru✉

² gyro105@yandex.ru

Abstract. This paper investigates the multi-agent traveling salesman problem with a common depot and dynamic distribution of service points. Unlike traditional approaches that require preliminary clustering and rigid assignment of points to agents, the proposed method ensures adaptive formation of service zones directly during route construction. The distribution principle is based on minimizing the distance to the agent's initial position, which leads to the formation of spatially separated and compact clusters. Routing within the formed subsets is performed using a modified ant colony algorithm, in which the transition probability accounts for, in addition to pheromone trail intensity and heuristic information inversely proportional to distance, an additional correcting factor reflecting the

candidate's proximity to the starting vertex. This architecture allows solving clustering and routing problems in a coordinated manner within a single optimization process, eliminating the need for a preliminary partitioning stage. To reduce computational complexity, multi-threaded processing of formed clusters is implemented, ensuring algorithm scalability as the number of agents increases. Results of computational experiments on standard test sets of various dimensions confirm the effectiveness of the proposed approach in terms of minimizing the total route length. It has been established that integrating the proximity factor to the initial position into the heuristic function contributes to the formation of more compact trajectories compared to the basic version of the ant colony algorithm. With comparable computational costs, the dynamic distribution scheme provides an improvement in the objective function by an average of 6% and also enhances the system's adaptability to dynamic changes in input parameters.

Keywords: multi-agent system, multiple traveling salesman problem, dynamic routing, ant colony optimization algorithm, points distribution, Hamiltonian cycle, transport logistics, adaptive heuristics

For citation: Khabarov V. I., Kvashnin V. E. The dynamic multi-agent approach to solving the traveling salesman problem. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(79):87–94. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_79_87.

Введение

Современные городские логистические системы функционируют в условиях необходимости постоянной адаптации маршрутов доставки. Данная потребность обусловлена интенсивными транспортными процессами в городской среде, характеризующейся высокой степенью динамичности (Dynamic Vehicle Routing Problem, DVRP).

Статические методы маршрутизации не учитывают изменения, происходящие в реальном времени: дорожные заторы, аварийные ситуации, изменение погодных условий и пр. Для логистических систем существенным является также фактор динамического изменения распределения заказов, что требует разработки адаптивных алгоритмов, способных оперативно реагировать на ситуацию.

Среди задач маршрутизации особую актуальность приобретает задача с несколькими агентами-коммивояжерами (Multiple Travelling Salesmen Problem, MTSP). В данной постановке каждый агент (коммивояжер) должен построить свой маршрут оптимальной длины, охватывающий подмножество точек посещения. Актуальной проблемой в таких задачах является динамическое распределение точек между агентами с учетом текущего состояния маршрутов и возникновения новых точек обслуживания.

Важным аспектом данного класса задач является конкуренция между агентами за точки обслуживания. Следует отметить, что в мультиагентном подходе важен не только критерий минимизации суммарной стоимости, но и критерий балансировки для предотвращения перегрузки отдельных агентов [1]. Таким образом, приоритетными становятся взаимосвязанные критерии: минимизация суммарной длины маршрутов и сбалансированное распределение точек обслуживания между агентами.

В большинстве случаев основой мультиагентного подхода являются метаэвристические алгоритмы, в частности алгоритм муравьиной колонии. Данный алгоритм зарекомендовал себя как эффективный инструмент, позволяющий строить маршруты при большом количестве точек обслуживания [2]. В современных исследованиях встречаются работы, где используется мультиагентный алгоритм муравьиной колонии с динамическим кооперативным механизмом [3]. В работе [4] предложен гибридный алгоритм муравьиной колонии, который учитывает временные окна и использует адаптивные параметры. В [5] изучена комбинация алгоритмов роевого интеллекта с методами машинного обучения. Кроме того, статья [6] посвящена модификации муравьиных алгоритмов и других метаэвристик, направленных на повышение устойчивости к локальным минимумам, на адаптивность к изменению условий и на комбинирование с другими алгоритмами (например, генетическими) для повышения качества решений.

В мультиагентной интерпретации каждый из агентов-коммивояжеров рассматривается как самостоятельный участник, принимающий решения на основе локальной информации и при необходимости взаимодействующий с другими агентами. Такой характер взаимодействий соответствует принципам автономности, кооперации и конкуренции, что характерно для мультиагентных систем в целом [7, 8]. Данные постановки задач содержат в себе два важных понятия – конкуренция и кооперация.

Задачи маршрутизации группы агентов традиционно формализуются в рамках обобщенной задачи коммивояжера для нескольких агентов. В такой постановке задано множество вершин графа маршрутной сети, соответствующих точкам обслуживания, транспортная сеть,

описываемая системой ребер графа с заданными стоимостными характеристиками, а также конечное множество агентов, для каждого из которых требуется построить замкнутый маршрут посещения подмножества вершин. При этом каждая вершина должна быть обслужена ровно одним агентом, а целевая функция обычно связана с минимизацией суммарных затрат, например длины маршрутов либо времени выполнения задач [9, 10]. В [11] предложен обобщенный вариант MTSP с включением общих точек обработки груза.

В зависимости от характера исходной информации и условий функционирования системы статическая и динамическая постановки задачи маршрутизации принципиально различаются требованиями к моделированию, методам решения и интерпретации получаемых результатов.

Статическая постановка MTSP предполагает неизменность исходных данных на протяжении всего процесса построения решения. Координаты точек обслуживания, параметры транспортной сети, характеристики агентов, ограничения по времени и ресурсам считаются заранее известными. Задача формулируется как задача дискретной оптимизации с фиксированным множеством допустимых решений. В рамках статического подхода формирование маршрутов осуществляется в режиме предварительного планирования, после чего полученное решение используется в процессе практической реализации.

Динамическая постановка MTSP предполагает изменение исходных данных в процессе построения маршрута и необходимость корректировки маршрутов в процессе их построения. Каждый агент рассматривается как автономная интеллектуальная система принятия решений, обладающая ограниченной локальной информацией и взаимодействующая с другими агентами через механизмы кооперации и конкуренции. В результате формирование маршрутов приобретает характер распределенного оптимизационного процесса. Одной из принципиальных особенностей динамической постановки является возможность перераспределения точек обслуживания между агентами. Такое перераспределение может быть обусловлено изменением текущих условий движения, загрузки агентов, приоритетности задач либо пространственной

конфигурации точек. Фактически речь идет о динамической кластеризации множества вершин графа с последующим уточнением маршрутов внутри сформированных кластеров.

Целью данной работы является разработка и исследование динамического подхода к кластеризации точек и построению маршрутов для нескольких коммивояжеров на основе муравьиного алгоритма. Основное внимание уделяется формированию стратегии распределения точек между группами в процессе построения маршрутов, обеспечивающей баланс между длиной маршрутов и числом точек у каждого агента, а также учитывающей локальные характеристики точек (такие как плотность близлежащих точек).

Методы исследования

Динамический подход предполагает интеграцию кластеризации и построения маршрутов в один адаптивный процесс, в котором маршруты формируются параллельно с закреплением точек за агентами. Суть процесса состоит в том, что каждый агент строит свой маршрут, выбирая очередные точки, конкурируя или договариваясь с другими агентами.

Представим этот процесс более формально. Имеется:

- множество агентов A :

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}; \quad (1)$$

- множество точек (вершин) транспортного графа V ;

- множество депо (стартовых точек) $W \subset V$;

- $d(i, j)$ – расстояние между точками обслуживания $i, j \in V$;

- структура маршрута агента $a_i \in A$:

$$p_i = \{w_i, v_{i_1}, \dots, v_{i_{n_i}}, w_i\} \in P_i,$$

$$\begin{aligned} w_i \in W, v_{i_r} \in V_i \setminus W, \bigcup_{i=1}^k V_i = V, \\ V_i \cap V_j = \emptyset, \forall i \neq j, \\ r \in \pi_i = \{i_1, i_2, \dots, i_{n_i}\}. \end{aligned} \quad (2)$$

Таким образом, агент $a_i \in A$ выезжает из своего депо w_i и обходит маршрут $p_i \subseteq V_i$, который не пересекается с маршрутами других агентов. Заметим, что заранее разбиение множества вершин $\bigcup_{i=1}^k V_i = V$, $V_i \cap V_j \neq \emptyset, \forall i \neq j$ при динамической постановке задачи сделать невозможно. Поэтому речь идет о процессе последовательного построения маршрутов $p_i \subseteq V_i$ и одновременного формирования кластеров V_i .

Распределение точек между агентами осуществляется с использованием модифицированного муравьиного алгоритма. Предполагается, что каждый агент реализует свой цикл муравьиного алгоритма [11] с фиксированным числом микроагентов (муравьев).

1. Агент a_i параллельно с другими агентами выбирает следующую точку $v_i \in V^*$, ближайшую к стартовой точке w_i :

$$v_i = \arg \min_{u \in V^*} d(u, w_i). \quad (3)$$

Эта точка должна быть свободной, т. е. не выбранной другим агентом, поэтому используется множество нераспределенных точек $V^* \in V$. Если это не так, то возникает конкуренция за эту точку. Предпочтение отдается тому агенту, для которого она оказывается ближе к стартовой.

2. Для группы V_i с текущим набором точек рассчитывается фактор близости точки v_i к стартовой точке w_i :

$$\varphi(v_i) = 1 + \gamma \left(1 - \frac{d(v_i, w_i)}{\max_{v \in V_i} d(v, w_i)} \right), \quad (4)$$

где $\gamma = 0,3$.

Формула вероятности перехода микроагента из точки i в точку j имеет вид

$$p_{ij}^k = \frac{[\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta \varphi(v_j)}{\sum_{l \in V^*} [\tau_{il}]^\alpha [\eta_{il}]^\beta \varphi(v_l)}, \quad (5)$$

где τ_{ij} – уровень феромона между соседними точками на пути из точки i в точку j ; α – коэффициент, контролирующий влияние феромона на ребре; $\eta_{ij} = 1/d(v_i, v_j)$ – привлекательность ребра i, j ; β – коэффициент, контролирующий влияние привлекательности ребра; $\varphi(v_j)$ – фактор близости точки j .

3. Чтобы принять решение о добавлении точки в кластер V_i , алгоритм также учитывает изменение длины маршрута при включении точки и размер группы. Первый критерий добавления точки – приемлемый прирост расстояния. Пусть $L_i = L(p_i)$ – текущая длина маршрута агента a_i . При добавлении новой точки v_j рассчитывается новая длина маршрута L_i' , т. е. $L_i' \leq \varepsilon L_i$. Значение параметра ε , определяющего коэффициент прироста длины маршрута при добавлении новой точки в группу, было установлено эмпирическим путем в ходе серии вычислительных экспериментов. В рамках исследования проводилось варьирование параметра ε в диапазоне от 1,1 до 1,5 с шагом 0,1 для наборов

данных с 300, 600 и 1 200 точками. Анализ результатов показал, что при значениях ε , близких к 1,0, алгоритм демонстрирует слишком «жесткое» поведение, ограничивая возможность самостоятельного добавления новых точек в маршрут. Это приводит к тому, что группы наполняются случайным образом. В свою очередь, при увеличении значения ε выше 1,3 наблюдается ухудшение качества маршрутов, которое связано с избыточным ростом их длины и нарушением баланса между группами агентов. На основании проведенного анализа установлено, что значение $\varepsilon = 1,2$ обеспечивает наилучший компромисс между длиной маршрутов и распределением точек. Результаты анализа показаны в табл. 1.

Вторым критерием добавления точки является баланс по числу точек в кластерах (группах). Объем каждой группы ϕ_i не должен превышать среднее количество точек на группу во избежание монополии, т. е.

$$\phi_i \leq \frac{|V|}{k}, i = 1, \dots, k. \quad (6)$$

4. После завершения итерации феромоны обновляются по следующему правилу:

$$\tau_{ij} = (1 - \rho)\tau_{ij} + \sum_{m=1}^k \Delta \tau_{ij}^m, \quad (7)$$

где ρ – коэффициент испарения феромона; τ_{ij}^l – количество феромона, добавляемое на ребро (i, j) агентом l .

В начале работы алгоритма все значения τ_{ij} равны нулю и обновляются после каждой итерации.

Алгоритм продолжается до тех пор, пока множество V не станет пустым, т. е. все точки будут распределены по группам, и каждая группа сформирует замкнутый маршрут $p_i \in P$.

Если по окончании всех итераций в множестве V остаются нераспределенные точки, то производится дополнительная стадия распределения. Каждая такая точка $v \in V$ назначается в ту группу V_i , для которой расстояние от точки v до центра кластера C_i минимально:

$$V_i = \arg \min_i d(v, C_i), \quad (8)$$

где $d(v, C_i)$ – расстояние между точкой v и центром кластера.

$$C_i = \frac{1}{|V_i|} \sum_{u \in V_i} u_j, i = 1, \dots, k. \quad (9)$$

После этого маршруты агентов пересчитываются с учетом добавленных точек для сохранения гамильтоновых циклов.

Таблица 1

Анализ параметра ε

Значение ε	Суммарная длина маршрутов	Прирост длины, %	Доля случайно распределенных точек, %	Время выполнения, с
<i>На примере 300 точек</i>				
1,1	237	–	4	55
1,2	244	2,95	0	65
1,3	250	5,49	0	80
1,4	258	8,86	0	103
1,5	273	15,19	0	117
<i>На примере 600 точек</i>				
1,1	25	–	4,5	718
1,2	27	8	0	745
1,3	44	76	0	780
1,4	52	108	0	802
1,5	68	172	0	824
<i>На примере 1 200 точек</i>				
1,1	31	–	5,3	2 952
1,2	37	19,4	0	3 077
1,3	52	67,7	0	3 154
1,4	67	116,1	0	3 265
1,5	79	154,8	0	3 321

Итоговая целевая функция имеет вид

$$\sum_{i=1}^k L(p_i) \rightarrow \min, \quad i = 1, \dots, k, \quad (10)$$

где $L(\cdot)$ – функция длины маршрута.

Результаты исследования

Для класса задач мультиагентной маршрутизации с использованием динамического подхода были проведены сравнительные вычислительные эксперименты по построению маршрутов на графе с 300 точками. Результаты приведены в табл. 2 и на рисунке. Для сравнения дополнительно указаны результаты выполнения алгоритмов с использованием статического подхода. Можно отметить, что динамический подход требует больше времени вычисления, но в то же время незначи-

тельно отстает по суммарной длине маршрута от роевых алгоритмов.

Входные параметры имеют следующие значения: количество групп – 2; количество муравьев (микроагентов) – 100; количество итераций – 20; α – 1,2; β – 3,5; ρ – 0,3.

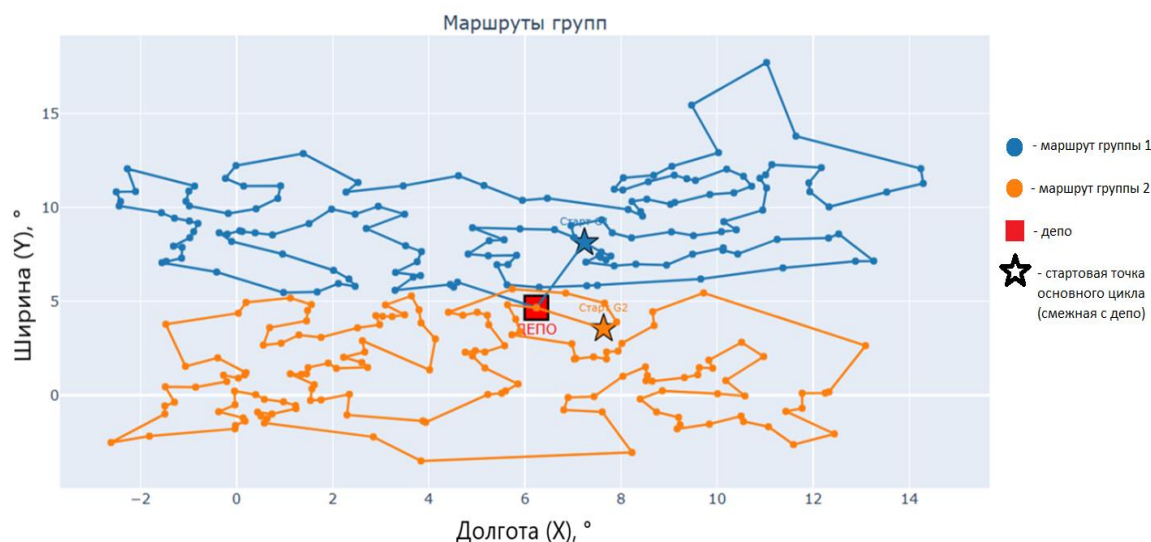
Также для проверки работоспособности в реальных условиях были проведены экспериментальные расчеты на графах, содержащих в себе 600 и 1 200 точек. Результаты данных экспериментальных расчетов представлены в табл. 3.

Анализ показывает, что показатель длины является производным от топологии графа, вследствие чего его рост не обязательно коррелирует с увеличением количества узлов. Временные затраты на выполнение операций,

Таблица 2

Сравнение результатов методов маршрутизации

Критерий/алгоритм	Генетический алгоритм	Алгоритм пчелиного роя	Алгоритм муравьиной колонии (традиционный подход)	Алгоритм имитации отжига	Алгоритм муравьиной колонии (динамический подход)
Длина маршрута: для группы 1	848,05	562,12	160,52	276,19	124,51
для группы 2	262,01	192,09	98,41	122,17	119,55
Суммарная длина	1 110,06	754,21	258,93	398,36	244,06
Время выполнения, с: для группы 1	18,69	9,57	31,5	0,45	65 для обеих групп суммарно
для группы 2	3,88	2,08	4,91	0,28	



Результаты работы динамического подхода

Таблица 3

Результаты работы динамического подхода на реальных данных

Критерий/набор данных	600 точек	1 200 точек
Длина маршрута: для группы 1	15,8	29,86
для группы 2	11,5	7,28
Суммарная длина	27,3	37,14
Время выполнения (для обеих групп), с	745,95	3 077,96

в свою очередь, демонстрируют устойчивую положительную корреляцию с размерностью графа.

Выводы

В данной работе рассмотрен динамический мультиагентный подход к решению задачи коммивояжера. В отличие от традиционных статических постановок, предполагающих раздельную модель кластеризации и построения гамильтоновых циклов с однократной оптимизацией при фиксированных исходных данных, предложенный алгоритм основан на сочетании кластеризации точек и построения маршрутов внутри кластеров.

Показано, что метод муравьиной колонии является весьма удобной метаэвристикой, поскольку позволяет организовать мультиагентное взаимодействие.

Вычислительные эксперименты дают основание сделать следующие выводы:

1) динамический подход требует больших вычислительных затрат по сравнению со статическим подходом;

2) на тестовых данных динамический подход показывает суммарную длину маршрута, которая на 6 % меньше, чем лучший показатель статического подхода.

В дальнейшем планируется развитие предложенного динамического подхода в направлении масштабирования на большее число агентов и кластеров, применения на реальных транспортных сетях с учетом временных ограничений и дорожной обстановки, а также интеграции обучающихся агентов, способных адаптировать параметры алгоритмов на основе накопленного опыта.

Список источников

1. Hassett C. Last-mile delivery statistics: the complete data resource for 2025 // SmartRoutes. 2025. URL: <https://smartroutes.io/blogs/last-mile-delivery-statistics-the-complete-data-resource> (дата обращения: 17.01.2026).
2. ITF, The Final frontier of urban logistics: tackling the last metres // ITF Mobility Innovation Hub. Paris : OECD Publishing, 2024. No. 131. URL: <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/final-frontier-urban-logistics.pdf> (дата обращения: 17.01.2026).

3. Holmes J., Brady-Phillips V. Transforming urban logistics: sustainable and efficient last-mile delivery in cities // *World Economic Forum*. 2024. URL: https://reports.weforum.org/docs/WEF_Transforming_Urban_Logistics_2024.pdf (дата обращения: 20.01.2026).
4. Мифтахов Э. Н., Акимов А. А., Гнатенко Ю. А. Методы роевой оптимизации частиц и локальных эвристик для решения мультиагентной задачи коммивояжера // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2025. Т. 25, № 5. С. 856–865. DOI 10.17586/2226-1494-2025-25-5-856-865.
5. Телегин В. А. Муравьиные алгоритмы для решения задачи коммивояжера // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2024. № 7 (145). URL: <https://research-journal.org/archive/7-145-2024-july/10.60797/IRJ.2024.145.64> (дата обращения: 23.01.2026).
6. Mo Y., You X., Liu S. Multi-colony ant optimization with dynamic collaborative mechanism and cooperative game // *Complex Intell.* 2022. Syst. 8. P. 4679–4696. DOI 10.1007/s40747-022-00716-7.
7. Olivari L., Đukić G. Current State of Dynamic Vehicle Routing Problems Solved by Ant Colony Optimization Algorithm // *Tehnički glasnik*. No. 15 (3). P. 429–434. DOI 10.31803/tg-20210708131104.
8. Wu H., Gao Y., Wang W. A hybrid ant colony algorithm based on multiple strategies for the vehicle routing problem with time windows // *Complex Intell.* 2023. Syst. 9. P. 2491–2508. DOI 10.1007/s40747-021-00401-1.
9. Dorigo M., Maniezzo V., Colomi A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part B (Cybernetics)*. 1996. Vol. 26, No. 1. P. 29–41. doi.org/10.1109/3477.484436.
10. Германчук М. С. Знаниеориентированные модели многоагентной маршрутизации. Симферополь : ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского», 2022. URL: http://www.science.vsu.ru/dissertations/10681/%D0%94%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%93%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%B0%D0%BD%D1%87%D1%83%D0%BA_%D0%9C.%D0%A1..pdf (дата обращения: 23.01.2026).
11. 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. DOI 10.52170/1815-9265_2025_74_94.

References

1. Hassett C. Last-Mile Delivery Statistics: The Complete Data Resource for 2025. *SmartRoutes*. 2025. URL: <https://smartroutes.io/blogs/last-mile-delivery-statistics-the-complete-data-resource>.
2. ITF, The Final Frontier of Urban Logistics: Tackling the Last Metres. ITF Mobility Innovation Hub No. 131, OECD Publishing, Paris. 2024. URL: <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/final-frontier-urban-logistics.pdf>.
3. Holmes J., Brady-Phillips V. Transforming Urban Logistics: Sustainable and Efficient Last-Mile Delivery in Cities. *World Economic Forum*. 2024. URL: https://reports.weforum.org/docs/WEF_Transforming_Urban_Logistics_2024.pdf.
4. Miftakhov E. N., Akimov A. A., Gnatenko Yu. A. Methods of swarm optimization of particles and local heuristics for solving the multi-agent traveling salesman problem. *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2025;25(5):856–865. (In Russ.). DOI 10.17586/2226-1494-2025-25-5-856-865.
5. Telegin V. A. Ant colony algorithms for solving the traveling salesman problem. *International Research Journal*. 2024;(145). (In Russ.). URL: <https://research-journal.org/archive/7-145-2024-july/10.60797/IRJ.2024.145.64>.
6. Mo Y., You X., Liu S. Multi-colony ant optimization with dynamic collaborative mechanism and cooperative game. *Complex Intell.* 2022. Syst. 8. P. 4679–4696. DOI 10.1007/s40747-022-00716-7.
7. Olivari L., Đukić G. Current State of Dynamic Vehicle Routing Problems Solved by Ant Colony Optimization Algorithm. *Tehnički Glasnik*. 2021;(15(3)):429–434. DOI 10.31803/tg-20210708131104.
8. Wu H., Gao Y., Wang W. A hybrid ant colony algorithm based on multiple strategies for the vehicle routing problem with time windows. *Complex Intell.* 2023. Syst. 9. P. 2491–2508. DOI 10.1007/s40747-021-00401-1.
9. Dorigo M., Maniezzo V., Colomi A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part B (Cybernetics)*. 1996;26(1):29–41. doi.org/10.1109/3477.484436.
10. Hermanchuk M.S. Knowledge-oriented models of multi-agent routing. Simferopol: V. I. Vernadsky Crimean Federal University; 2022. (In Russ.). URL: http://www.science.vsu.ru/dissertations/10681/%D0%94%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%93%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%B0%D0%BD%D1%87%D1%83%D0%BA_%D0%9C.%D0%A1.pdf.
11. Khabarov V. I., Kvashnin V. E. Multi-agent routing systems in organizing urban transportation. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(74):94–102. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_74_94.

Информация об авторах

В. И. Хабаров – доктор технических наук, профессор, академик Российской академии транспорта, декан факультета «Бизнес-информатика», заведующий кафедрой «Информационные технологии на транспорте» Сибирского государственного университета путей сообщения, профессор кафедры теоретической и прикладной информатики Новосибирского государственного технического университета.

В. Е. Квашнин – аспирант кафедры «Информационные технологии на транспорте» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

V. I. Khabarov – Doctor of Engineering, Professor, Academician of Russian Academy of Transport, Dean of the Information Technology in Business Faculty, Head of the Information Technologies in Transport Department, Siberian Transport University, Professor of the Theoretical and Applied Information Science Department, Novosibirsk State Technical University.

V. E. Kvashnin – Postgraduate of the Information Technologies in Transport Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 12.05.2026; одобрена после рецензирования 25.05.2026; принята к публикации 28.05.2026.

The article was submitted 12.05.2026; approved after reviewing 25.05.2026; accepted for publication 28.05.2026.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья
УДК 624.131.8:625.7
doi:10.52170/1815-9265_2026_79_95

Учет характеристик грунтов земляного полотна автомобильных дорог при реализации дорожных проектов

Октябрин Владимирова Никулич¹, Валерий Степанович Воробьев²✉

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

¹ okti888@mail.ru

² vorobjevvs@yandex.ru✉

Аннотация. Реализация дорожных проектов по государственным программам развития автомобильных дорог, повышения безопасности дорожного движения и обеспечения безопасности населения на транспорте требует качественного проектирования автомобильных дорог, в частности земляного полотна и дорожной одежды. В указанных условиях повышаются требования как к проектным решениям, так и к достоверности исходных данных, в том числе к данным об инженерно-геологических условиях, которые являются основой обеспечения долговечности, безопасности и экономической эффективности дорожных конструкций при современной динамике увеличения стоимости строительства.

Для оценки влияния учета характеристик грунтов земляного полотна автомобильных дорог существующей сети на реализацию дорожных проектов по ремонту, капитальному ремонту и реконструкции проанализированы: информация о грунтах земляного полотна, полученная в ходе проведения инженерно-геологических изысканий; расхождения между расчетной и фактической относительной влажностью грунта (по формуле п. 3.5 ГОСТ Р 71404–2024); дорожные конструкции, определенные с применением расчетной и фактической относительной влажности грунта. По результатам анализа установлено распределение видов грунтов земляного полотна на территории Новосибирской области и определены характерные свойства, требующие специальных мероприятий по замене или укреплению грунта рабочего слоя земляного полотна. Выявлены различия в значении расчетной относительной влажности, устанавливаемой с использованием табличных данных из действующих нормативных документов, и фактической относительной влажности грунта, полученной на основе данных из отчетов по инженерно-геологическим изысканиям.

Результаты проведенного исследования позволяют для практических целей управления рисками дорожных проектов отнести региональный учет характеристик грунтов к фактору риска, напрямую влияющему на реализацию дорожных проектов. В связи с чем рекомендовано при проектировании учитывать фактические данные о грунтах и внести соответствующие требования по определению региональных характеристик грунтов в техническое задание на разработку дорожных проектов.

Ключевые слова: дорожный проект, дорожная конструкция, глинистые грунты, инженерно-геологические изыскания, относительная влажность грунта, рабочий слой, фактор риска

Для цитирования: Никулич О. В., Воробьев В. С. Учет характеристик грунтов земляного полотна автомобильных дорог при реализации дорожных проектов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 2 (79). С. 95–101. DOI 10.52170/1815-9265_2026_79_95.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Consideration of highway subgrade characteristics in the implementation of road projects

Oktiabrina V. Nikulich¹, Valery S. Vorobyov²✉

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

¹ okti888@mail.ru

² vorobjevvs@yandex.ru✉

Abstract. Implementation of road projects under state programs for highway development, road safety improvement, and transportation safety requires high-quality design of road structures, particularly subgrade and pavement layers. Under these conditions, demands increase for both design solutions and the reliability of initial data, especially regarding geotechnical conditions, which form the basis for the durability, safety, and economic efficiency of road structures amid rising construction costs.

To assess the impact of accounting for subgrade soil characteristics on road projects involving repair, major repair, and reconstruction, the following were analyzed: soil data obtained during geotechnical investigations;

discrepancies between calculated and actual soil relative humidity (per Eq. 3.5 of GOST R 71404-2024); and road structures designed using both calculated and actual relative humidity values. The analysis revealed the distribution of subgrade soil types across Novosibirsk Region and identified key properties requiring special measures for soil replacement or reinforcement. Significant differences were found between calculated relative humidity values based on standard tables and those derived from actual field data in geotechnical reports.

Based on the study results, it is recommended that regional soil characteristics be classified as a critical risk factor directly affecting road project implementation. Therefore, it is advised to incorporate requirements for defining regional soil properties into technical specifications for road project development.

Key words: road project, road structure, loamy ground, engineering-geological survey, soil relative humidity, capping layer, risk driver

For citation: Nikulich O. V., Vorobyov V. S. Consideration of highway subgrade characteristics in the implementation of road projects. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(79):95–101. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_79_95.

Введение

Согласно п. 8 ст. 3 ТР ТС 014/2011 «Безопасность автомобильных дорог» безопасность автомобильных дорог и дорожных сооружений на них, а также связанных с ними процессов проектирования (включая изыскания), строительства, реконструкции, капитального ремонта и эксплуатации обеспечивается посредством установления и соблюдения соответствующих требований безопасности проектных значений параметров, показателей прочности, надежности и устойчивости конструктивных элементов в течение всего срока службы. Одним из ключевых условий выполнения этих требований является достоверность исходных данных о природно-климатических и инженерно-геологических условиях территории строительства.

Действующие нормативы [1–3] предъявляют обобщенные требования к грунтам, не дифференцируя их по типу, составу и региональным особенностям. Методики проектирования используют усредненные табличные значения влажности грунтов, не учитывающие региональную вариабельность, что приводит к недооценке деформационных характеристик и требуемой прочности дорожной конструкции и, как следствие, росту рисков при эксплуатации дорог.

Современные методы доведения грунтов рабочего слоя до нормативных показателей включают [4–7]:

- замену пучинистых грунтов на непучинистые или слабопучинистые;
- частичное укрепление вяжущими;
- стабилизацию грунта с применением химических или цементирующих добавок.

Перечисленные факторы (на примере вышеуказанных мероприятий по укреплению грунтов) свидетельствуют о том, что в процессе

строительно-монтажных работ на автомобильной дороге потребляется значительный объем привозных ресурсов. В свою очередь, это оказывает влияние на производственную логистику, связанную с поставками материально-технических ресурсов на участки строительства и необходимостью создания запасов на строительной площадке, что ведет к дополнительным затратам на транспортную и складскую логистику, соизмеримым со стоимостью самих ресурсов, и существенно влияет на экономическую эффективность проектов [8].

Кроме того, актуальность исследования обусловлена обновлением нормативной базы: во вступивших в силу СП 34.13330.2021 (актуализированной редакции СНиП 2.05.02-85*) и ГОСТ Р 71404–2024 «Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования» значительно повышены требования к транспортно-эксплуатационным характеристикам дорожной конструкции, в частности к определению модуля упругости рабочего слоя земляного полотна, который, согласно п. 6.13.1 ГОСТ Р 71404–2024, теперь жестко привязан к дорожно-климатической зоне.

Согласно данным [9] средняя стоимость дорожных проектов в Новосибирской области за 2020–2024 гг. выросла на 22 %, что частично обусловлено необходимостью адаптации проектов к новым требованиям, предъявляемым к грунтам, а также увеличением объемов укрепления и замены рабочего слоя.

Особое внимание к характеристикам грунтов земляного полотна и подходу к их учету при проектировании уделено в работах современных ученых. Исследования В. Н. и С. В. Ефименко [10] показали: около 40 % глинистых грунтов в Западной Сибири имеют физико-механические параметры, отличающиеся от нормативных зна-

чений, что указывает на необходимость региональной калибровки проектных решений. Аналогичные выводы содержатся в работах [11–13], в которых акцент делается на связи между характеристиками грунтов и возникновением деформаций в дорожной одежде. Учет только экономической составляющей инвестиционной значимости дорожного проекта производится в [14, 15]. Однако в проведенных исследованиях не предложены количественные методы интеграции этих данных в проектные алгоритмы.

Целью данного исследования является установление статистической связи между отклонением фактической относительной влажности грунтов земляного полотна от расчетных значений, предписанных ГОСТ Р 71404–2024, и изменением прочностных параметров дорожных конструкций в Новосибирской области с целью обоснования необходимости включения грунтовых характеристик как количественно оцениваемого фактора риска в методику проектирования.

Материалы и методы исследования

Исследование основано на анализе данных из отчетов по инженерно-геологическим изысканиям на 100 объектах ремонта, капитального ремонта и реконструкции, выполненных на участках автомобильных дорог Новосибирской области в рамках реализации дорожных проектов.

Методы сбора и обработки данных включали:

- систематизацию данных о разновидностях грунтов (по классификации ГОСТ 25100–2020);
- сопоставление классификации грунтов по степени пучинистости (СП 34.13330.2021, таблица В.7) с их распространенностью по районам области;
- анализ расхождений между расчетной и фактической относительной влажностью грунта (по формуле п. 3.5 ГОСТ Р 71404–2024);
- анализ дорожных конструкций, определенных с применением расчетной и фактической относительной влажности грунта.

Объектами исследования выступили следующие участки территориальных и межмуниципальных автомобильных дорог Новосибирской области:

- 992 км а/д Р-254 – Купино – Карасук (50 ОП РЗ 50К-01);
- Чаны – Венгерово – Кыштовка (50 ОП РЗ 50К-02);
- Куйбышев – Северное (50 ОП РЗ 50К-04);

- Здвинск – 157 км а/д К-01 (50 ОП РЗ 50К-06);
- Здвинск – Довольное – 17 км а/д К-09 (50 ОП РЗ 50К-07);
- 60 км а/д К-09 – Довольное (50 ОП РЗ 50К-08);
- 203 км а/д К-17р – Каргат (50 ОП РЗ 50К-09);
- Новосибирск – Колывань – Томск (в границах НСО, 50 ОП РЗ 50К-12);
- 54 км а/д Р-254 – Завьялово – Факел Революции (50 ОП РЗ 50К-13);
- 104 км а/д Р-256 – Сузун (50 ОП РЗ 50К-14);
- 104 км а/д Р-256 – Черепаново – Маслянино (50 ОП РЗ 50К-15);
- Новосибирск – Кочки – Павлодар (в границах РФ, 50 ОП РЗ 50К-17р);
- Новосибирск – Ленинск-Кузнецкий (в границах НСО, 50 ОП РЗ 50К-19р);
- Барабинск – Куйбышев (50 ОП РЗ 50К-23);
- Сузун – Битки – Преображенка – 18 км а/д К-13 (в границах района, 50 ОП РЗ 50К-29);
- Инская – Барышево – 39 км а/д К-19р (в границах района, 50 ОП МЗ 50Н-2107).

Особое внимание уделено глинистым грунтам (глине, суглинку, супеси), поскольку им свойственна высокая пучинистость и наибольшая чувствительность к изменениям влажности, что напрямую влияет на долговечность дорожной конструкции.

Фактическая влажность определена по ГОСТ 5180–2015 (лабораторные испытания).

Расчетная относительная влажность связанного грунта W_p рассчитана по формуле (В.1), приведенной в приложении В к ГОСТ Р 71404–2024 [4]:

$$W_p = (W_{\text{табл}} + \Delta + \Delta_1 W - \Delta_2 W) \times (1 + V_r t) - \Delta_3.$$

В настоящем исследовании проанализировано 75 значений расчетной влажности, полученных по данным из отчетов по инженерно-геологическим изысканиям. В ходе исследования были изучены расчеты дорожных одежд на объектах реконструкции, капитального ремонта и ремонта автомобильных дорог в Новосибирской области, выполненные в соответствии с требованиями ГОСТ Р 71404–2024.

Основные исходные данные для расчетов включали:

- дорожно-климатическую подзону – III₁;
- региональную характеристику – Западно-Сибирский регион с равнинным рельефом;

- количество расчетных дней в году – 140;
- изолинию термического сопротивления дорожной конструкции – IX;
- категории дорог – III и IV;
- тип дорожных одежд – капитальные;
- физико-механические свойства грунтов рабочего слоя, определенные на основе инженерно-геологических изысканий и принятые по ГОСТ Р 71404;
- схему увлажнения рабочего слоя и глубину промерзания, установленные по результатам инженерно-геологических изысканий;
- среднегодовую температуру воздуха, взятую из СП 131.13330.2020;
- укрепление обочин (не менее 2/3 их ширины) каменными материалами без применения вяжущего (ЩПС).

Результаты исследования

Анализ грунтов земляного полотна, представленных в отчетах по инженерно-геологическим изысканиям на рассматриваемых участках, выявил характерные для Новосибирской области следующие виды:

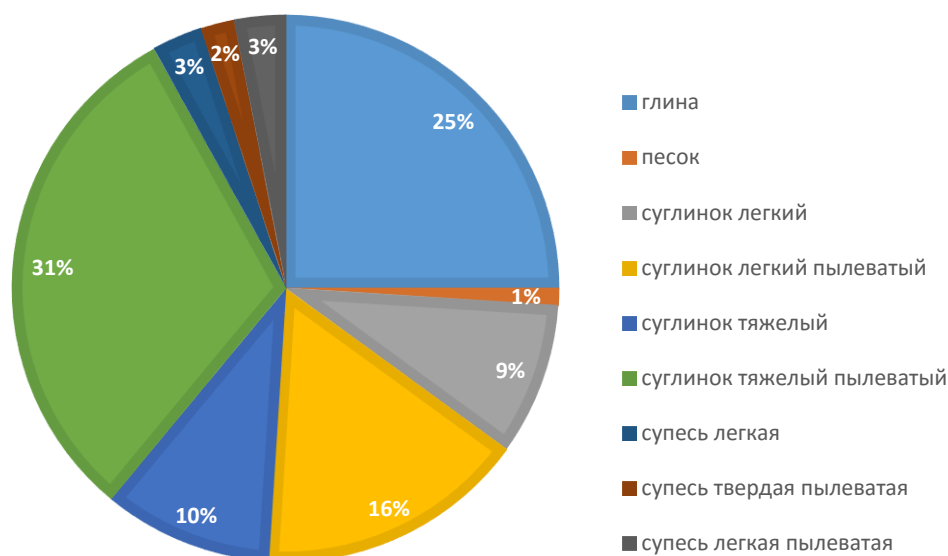
- глина;
- песок;
- суглинок легкий;
- суглинок легкий пылеватый;
- суглинок тяжелый;
- суглинок тяжелый пылеватый;
- супесь легкая;
- супесь твердая пылеватая;
- супесь легкая пылеватая.

- Наиболее распространенными оказались:
- суглинки тяжелые пылеватые (32 %);
 - глины (25 %);
 - суглинки легкие пылеватые (16 %).

Распределение грунтов по районам имеет выраженную региональную дифференциацию. На северо-западе области в Усть-Таркском, Венгеровском, Чановском, Северном районах преобладают глины, а в центральной части области (в Барабинском, Убинском, Доволенском районах), на юго-западе и юго-востоке (в Татарском, Чистоозерном, Сузунском, Черепановском, Маслянинском районах) представлены преимущественно суглинки тяжелые пылеватые. Суглинки легкие пылеватые можно встретить в центральной и северной частях Новосибирской области (в Ордынском, Новосибирском, Убинском районах). На рисунке представлено распределение вышеуказанных видов грунтов на автомобильных дорогах Новосибирской области.

Согласно таблице В.7 СП 34.13330.2021 суглинок тяжелый пылеватый относится к IV группе по степени пучинистости и классифицируется как сильнопучинистый, суглинок легкий пылеватый относится к V группе (чрезмерно пучинистый), а глины – к III (пучинистые). Это означает, что более 72 % грунтов на исследуемых участках требуют обязательных мероприятий по укреплению или замене рабочего слоя для соответствия требованиям ГОСТ Р 71404–2024.

В ходе исследования получено распределение значений расчетной влажности, определен-



Виды и процентное распределение грунтов на территории Новосибирской области

ных в ходе инженерно-геологических изысканий. Распределение имеет нормальную форму, с пиком в интервале 0,611–0,670. Большинство значений (около 60 %) находится в диапазоне 0,552–0,729.

Ключевым выявленным расхождением стало отличие фактической относительной влажности грунта (по данным изысканий) от расчетной влажности, используемой в проектах и определяемой по табличным значениям ГОСТ Р 71404–2024. В 44 % от общего числа исследуемых объектов фактическая влажность превышала расчетную на 9–23 %, что, в случае использования в расчете табличных значений, приводило к завышению расчетного модуля упругости на поверхности рабочего слоя и, как следствие, недооценке толщины дорожной одежды.

Таким образом, использование усредненных табличных данных вместо фактических результатов изысканий повышает риск:

- недостаточной несущей способности дорожной конструкции;
- преждевременного разрушения покрытия;
- увеличения материальных и логистических затрат на реконструкцию, капитальный ремонт и ремонт автомобильных дорог.

Выводы

Установлено, что фактическая относительная влажность глинистых грунтов в Новосибирской области превышает расчетную в среднем на 16 %, а существующее земляное полотно автомобильных дорог преимущественно устроено из суглинков тяжелых пылеватых, глин и суглинков легких пылеватых.

Результаты анализа особенностей грунтов Новосибирской области позволяют сделать вы-

вод о том, что потенциально возможные неблагоприятные изменения основных решений в пользу табличных данных, связанные с принятием решений по доведению до нормативных требований характеристик глинистых грунтов на стадии проектирования, при наблюдающейся динамике увеличения стоимости строительства показывают высокую степень влияния характеристик грунтов земляного полотна автомобильных дорог на реализацию дорожных проектов.

В этих условиях вероятность использования результатов изысканий низкого качества и непроработанность технических решений при проектировании существенно повышают риск получения неэффективных дорожных конструкций, как в части их материалоемкости, так и по показателям прочности, надежности и долговечности.

На основании вышесказанного, согласно ОДМ 218.4.023–2015 «Методические рекомендации по оценке эффективности строительства, реконструкции, капитального ремонта и ремонта автомобильных дорог», учет характеристик грунтов можно классифицировать как фактор риска при осуществлении дорожных проектов, являющийся одним из важных условий обеспечения действительной реализуемости дорожных проектов.

Таким образом, для снижения рисков необходимо использовать в дорожных проектах фактические данные изысканий, а не табличные значения. Для заказчиков рекомендуется включать в техническое задание на проектно-изыскательские работы обязательное определение влажности по ГОСТ 5180–2015 с дальнейшим ее учетом при проектировании.

Список источников

1. ГОСТ Р 58397–2019. Дороги автомобильные общего пользования. Правила производства работ. Оценка соответствия : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 апреля 2019 г. № 137-ст : внесено Изменение № 1. Москва : Стандартинформ, 2019. Доступ из справочно-правовой системы «Техэксперт».
2. СП 78.13330.2012. Автомобильные дороги : актуализированная редакция СНиП 3.06.03–85 : утвержден приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 30 июня 2012 г. № 272 : введен в действие с 1 июля 2013 г. : внесены Изменения № 1, 2, 3. Москва : Минрегион России, 2013. Доступ из справочно-правовой системы «Техэксперт».
3. ГОСТ 23558–94. Смеси щебеночно-гравийно-песчаные и грунты, обработанные неорганическими вяжущими материалами, для дорожного и аэродромного строительства. Технические условия : принят Межгосударственной научно-технической комиссией по стандартизации и техническому нормированию в строительстве 10 ноября 1993 г. : внесены Изменения № 1, 2. Москва : Стандартинформ, 2005. Доступ из справочно-правовой системы «Техэксперт».

4. ГОСТ Р 71404–2024. Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 5 августа 2024 г. № 1022-ст. Москва : РСТ, 2024. Доступ из справочно-правовой системы «Техэксперт».

5. Могилевич В. М., Щербак Р. П., Никитин В. П. Подбор состава цементогрунта с учетом технологии работ // Автомобильные дороги. 1969. № 2. С. 11–12.

6. СП 34.13330.2021. Автомобильные дороги : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 9 февраля 2021 г. № 53/пр : введен в действие с 10 августа 2021 г. Доступ из справочно-правовой системы «Техэксперт».

7. Безрук В. М. Основные принципы укрепления грунтов. Москва : Транспорт, 1987. 31 с.

8. Воробьев В. С., Ланис А. Л., Попова Ю. В. Оптимальное управление поставками и запасами материальных ресурсов на строительстве линейно-распределенных объектов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2017. № 7 (703). С. 100–109.

9. Никулич О. В. Актуальные проблемы проектирования дорожных одежд // Дорожная держава. 2023. № 121. С. 52–55.

10. Ефименко В. Н., Ефименко С. В., Самойлова А. В. Пути обеспечения качества проектирования дорожных одежд в природно-климатических условиях Западно-Сибирского региона // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21, № 5. С. 165–179. DOI 10.31675/1607-1859-2019-21-5-165-179.

11. Пути обеспечения качества проектирования дорожных одежд автомобильных дорог Западно-Сибирского региона / В. Н. Ефименко, С. В. Ефименко, М. В. Бакина, О. В. Коняева // Развитие дорожно-транспортного комплекса и строительной инфраструктуры на основе рационального природопользования : материалы VII Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием), Омск, 26–27 апреля 2012 года. Книга 1. Омск : Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2012. С. 81–84.

12. Карелина Е. Л. Мониторинг и прогнозирование физико-механических характеристик грунтов в зоне расположения водопропускных труб автомобильных дорог : специальность 2.1.8 «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Карелина Елена Леонидовна. Н., 2023. 24 с.

13. Воробьев В. С., Пак Е. Л. Влияние физико-механических характеристик грунта земляного полотна на образование деформаций дорожной одежды // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 1 (60). С. 190–199.

14. Горин В. С., Персианов В. А. Научно-методические аспекты денежной оценки эффективности проектов и программ развития транспорта // Вестник транспорта. 2017. № 6. С. 28–32.

15. Теория и практика принятия решений о реализации крупномасштабных транспортных проектов / В. Н. Лившиц, И. А. Миронова, Т. И. Тищенко, М. П. Фролова // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2023) : труды Шестнадцатой Международной конференции, Москва, 26–28 сентября 2023 года. Москва : Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2023. С. 155–165. DOI 10.25728/mlsd.2023.0155.

References

1. GOST R 58397–2019. Automobile roads of general use. Rules of carrying out the works. Conformity assessment: approved and put into effect by the Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology of 18.04.2019 No. 137-st. Official edition. Moscow: Standardinform; 2019. Access from the reference-legal system 'Tehekspert'. (In Russ.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200163882?section=text>.

2. SP 78.13330.2012. Automobile roads (with Amendments No. 1, 2, 3): approved by the order of the Ministry of Regional Development of the Russian Federation (Minregion of Russia) from 30.06.2012 No. 272: enacted from 01.07.2013. Moscow: Ministry of Regional Development of Russia; 2013. Access from the reference-legal system 'Tehekspert'. (In Russ.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095529?section=text>.

3. GOST 23558–94. Crushed stone-gravel-sandy mixtures, and soils treated by inorganic binders for road and airfield construction. Specifications (with Amendments No. 1, 2): adopted by the Interstate Scientific and Technical Commission on standardization and technical norming in construction on 10.11. 1993. Official edition. Moscow: Standardinform; 2005. Access from the reference-legal system 'Tehekspert'. (In Russ.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/901705984?section=text>.

4. GOST R 71404–2024. Automobile roads of general use. Flexible pavement. Design rules [Electronic resource]: approved and put into effect by the Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology of 05.08. 2024,

No. 1022-st. Official edition. Moscow: 'RST'; 2024. Access from the reference-legal system 'Tehekspert'. (In Russ.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1306977203?marker§ion=text>.

5. Mogilevich V. M., Scherbakova R. P., Nikitin V. P. Selection of cement-soil composition taking into account the technology of works. *Automobile Roads*. 1969;(2):11–12. (In Russ.).

6. SP 34.13330.2021. Automobile roads: approved by the order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation from 09.02.2021 № 53/pr: enacted from 10.08.2021. Access from the reference-legal system. (In Russ.). URL: 'Tehekspert'. <https://docs.cntd.ru/document/573818172?section=text>.

7. Bezruk V. M. Basic principles of soil reinforcement. Moscow: Transport; 1987. 31 p (In Russ.).

8. Vorobyov V. S., Lanis A. L., Popova Ju. V. Optimal management of supplies and reserves of material resources on the construction of linear-distributed objects. *Journal of High Schools. Construction*. 2017;(703):100–109. (In Russ.).

9. Nikulich O. V. Current problems of pavement design. *Road Empire*. 2023;(121):52–55. (In Russ.).

10. Efimenko V. N., Efimenko S. V., Samoilova A. V. Quality design of road pavements in west Siberian climatic conditions. *Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2019;21(5):165–179. (In Russ.). DOI 10.31675/1607-1859-2019-21-5-165-179.

11. Efimenko V. N., Efimenko S. V., Badina M. V., Konyayeva O. V. Ways to ensure the quality of design of road pavements of motorways in the West Siberian region. *Development of road transport complex and construction infrastructure on the basis of rational nature management. Proceedings of the VII All-Russian Scientific and Practical Conference (with international participation), Omsk, 26–27 April 2012*. Book 1. Omsk: Siberian State Automobile and Highway University (SibADI); 2012. P. 81–84. (In Russ.).

12. Karelina E. L. Monitoring and forecasting of physical and mechanical characteristics of soils in the zone of road culverts location: specialty 2.1.8 'Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels. Author's abstract of the candidate's thesis. Karelina Elena Leonidovna. N.; 2023. 24 p. (In Russ.).

13. Vorobyov V. S., Pak E. L. Mechanical-and-physical properties of subgrade soil and pavement deformation. *Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2017;(60):190–199. (In Russ.).

14. Gorin V. S., Persianov V. A. Scientific and methodological aspects of monetary evaluation of the effectiveness of projects and programmes of transport development. *Transport Bulletin*. 2017;(6):28–32. (In Russ.).

15. Livshits V. N., Mironova I. A., Tishchenko T. I., Frolova M. P. Theory and practice of decision-making on the implementation of large-scale transport projects. *Management of Large Scale Systems Development (MLSD'2023): Proceedings of the Sixteenth International Conference, Moscow, 26–28 September 2023*. Moscow: V. A. Trapeznikov Institute of Control Problems, Russian Academy of Sciences; 2023. P. 155–165. (In Russ.). DOI 10.25728/mlsd.2023.0155.

Информация об авторах

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

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

Information about the authors

O. V. Nikulich – Postgraduate of the Organization and Economics of Construction Department, Siberian Transport University.

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

Статья поступила в редакцию 07.05.2026; одобрена после рецензирования 13.05.2026; принята к публикации 14.05.2026.

The article was submitted 07.05.2026; approved after reviewing 13.05.2026; accepted for publication 14.05.2026.

Научная статья
УДК 624.159.2
doi:10.52170/1815-9265_2026_79_102

Стабилизация земляного полотна из дренирующих грунтов при проектировании вторых путей железных дорог в условиях вечной мерзлоты

Александр Леонидович Исаков^{1✉}, Ирина Сергеевна Моисеева²

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

¹ mylab.alex@yandex.ru✉

² is_moiseeva@mail.ru

Аннотация. При длительной эксплуатации железных дорог в криолитозоне, в частности Байкало-Амурской магистрали, под существующим земляным полотном из дренирующих грунтов в районах распространения высокотемпературных мерзлых грунтов образовались так называемые чаши протаивания. Ключевым фактором их формирования является инфильтрация атмосферных осадков в тело земляного полотна. Количественная оценка этого эффекта в рамках традиционных теплофизических расчетов весьма проблематична в связи с неконтролируемым характером фильтрационных процессов, происходящих в теле земляного полотна. Особую актуальность проблема фильтрации осадков приобретает в связи с тем, что в рамках модернизации Байкало-Амурской магистрали с целью повышения пропускной способности предусматривается строительство вторых путей на общем земляном полотне, которое отсыпается преимущественно из дренирующих крупнообломочных скальных грунтов с учетом действующих норм проектирования.

В данной статье предложена и проиллюстрирована расчетами гипотеза о решении проблемы учета отепляющего действия атмосферных осадков на грунты основания земляного полотна. Суть ее заключается во введении понятия инфильтрационной теплопроводности, учитываемой при определении суммарного коэффициента теплопроводности дренирующих грунтов земляного полотна, находящихся в талом состоянии. Такой подход к описанию теплофизической картины дренирующих грунтов земляного полотна и его основания позволил обосновать предложенную в работе технологическую схему поэтапной стабилизации границы мерзлых грунтов в основании насыпи при строительстве вторых путей. Технологическая схема, предложенная в статье, обеспечивает исключение отепляющего воздействия атмосферных осадков на грунты основания земляного полотна. Отличительной особенностью схемы является поэтапная укладка гидроизоляции в верхней части как вновь возводимого, так и существующего земляного полотна, способствующая восстановлению мерзлого состояния грунта под эксплуатируемым путем.

Ключевые слова: земляное полотно, многолетне-мерзлые грунты, коэффициент теплопроводности, вторые пути, инфильтрация атмосферных осадков, гидроизоляционный экран

Для цитирования: Исаков А. Л., Моисеева И. С. Стабилизация земляного полотна из дренирующих грунтов при проектировании вторых путей железных дорог в условиях вечной мерзлоты // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 2 (79). С. 102–113. DOI 10.52170/1815-9265_2026_79_102.

Original article

Stabilization of the subgrade formed by draining soils in the design of second tracks on railways in cold regions

Alexander L. Isakov^{1✉}, Irina S. Moiseeva²

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

¹ mylab.alex@yandex.ru✉

² is_moiseeva@mail.ru

Abstract. During the operation of railways in the cryolithozone, in particular the Baikal-Amur Mainline, so-called thawing bowls were formed under the existing earth bed from draining soils in areas of high-temperature frozen soils. The infiltration of atmospheric precipitation into the body of the earth's surface is a key factor in its formation. Quantification of this effect is very problematic due to the uncontrolled nature of filtration processes in the body of the earth bed within the framework of traditional thermophysical calculations. The issue of precipitation filtration is particularly pressing given that the modernization of the Baikal-Amur Mainline, aimed at increasing its capacity,

envisions the construction of second tracks on a common subgrade, which is primarily made of drainable coarse-grained rocky soils, in accordance with current design standards.

In this article, a hypothesis is proposed and justified by numerical modeling to solve the problem of accounting for the warming effect of atmospheric precipitation on the soils of the foundation of the roadbed. Its essence lies in the introduction of the concept of infiltration thermal conductivity, which is taken into account when determining the total coefficient of thermal conductivity of the draining soils of the earth bed in a thawed state. This approach to the description of the thermophysical picture of the draining soils of the earth bed and its base allowed us to substantiate the technological scheme proposed in the work for the phased stabilization of the frozen soil boundary at the base of the embankment during the construction of the second tracks. The process flow diagram proposed in the article eliminates the impact of the warming effect of atmospheric precipitation on the soils of the subgrade foundation. A distinctive feature of the diagram is the staged installation of waterproofing in the upper portion of both the newly constructed and existing subgrade, facilitating the restoration of the frozen state of the soil beneath the operational track.

Keywords: subgrade, permafrost soils, conductivity coefficient, second tracks, precipitation infiltration, waterproofing screen

For citation: Isakov A. L., Moiseeva I. S. Stabilization of the subgrade formed by draining soils in the design of second tracks on railways in cold regions. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(79):102–113. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_79_102.

Введение

В процессе эксплуатации Байкало-Амурской магистрали (БАМа) на участках распространения высокотемпературных многолетне-мерзлых грунтов по результатам мониторинга, осуществляемого Дальневосточной железной дорогой, фиксируются неравномерные осадки земляного полотна из дренирующих грунтов, искажение плана и продольного профиля трассы, расползание откосов насыпей [1–3]. В результате инженерно-геологических изысканий, выполненных СГУПС на участке Байкало-Амурской магистрали, выявлены так называемые чаши протаивания – зоны оттаявших многолетне-мерзлых грунтов, сформированные в основании земляного полотна, которые являются причиной неравномерной осадки и других

деформаций (рис. 1). Скорость деградации многолетне-мерзлых грунтов в основании земляного полотна существующих железных дорог Восточной Сибири и Дальнего Востока, по данным исследования [4], сегодня составляет около 1–2 см/год. При этом в условиях экстремальных атмосферных осадков, частота и интенсивность которых на территории России имеют тенденцию к росту, скорость деформаций может увеличиваться до 7–9 см/год [5].

Фундаментальными причинами деградации многолетне-мерзлых грунтов в основании земляного полотна железных дорог являются нарушение баланса теплового потока на его поверхности и тепляющее действие атмосферных осадков [6]. Важно заметить, что особенно сильно влияние фильтрующегося поверхност-



Рис. 1. Деформации земляного полотна из-за протаивания льдистых грунтов основания

ного стока наблюдается на участках земляного полотна, сложенного из дренирующих грунтов, через которое вода свободно попадает в подстилающие насыпь грунты. При этом вода оказывает обогревающий эффект и способствует понижению верхней границы мерзлых грунтов (рис. 2), т. е. формированию чаши протаивания непосредственно под насыпью [7].

С целью минимизации рисков возникновения деформаций из-за оттаивания мерзлых грунтов основания в настоящее время на этапе проектирования линейных объектов транспортной инфраструктуры выполняется прогноз температурного режима мерзлых грунтов основания с помощью теплофизических расчетов, а также предусматривается геокриологический мониторинг на период строительства и эксплуатации для наблюдения и контроля за температурным режимом земляного полотна.

Особую актуальность проблема фильтрации осадков приобретает в связи с тем, что в рамках модернизации Байкало-Амурской магистрали с целью повышения пропускной способности предусматривается строительство вторых путей на общем земляном полотне, которое отсыпается преимущественно из дренирующих крупнообломочных скальных грунтов с учетом действующих норм проектирования.

В настоящей статье с использованием введенного понятия инфильтрационной тепло-

проводности обосновывается технологическая схема отсыпки насыпи под вторые пути из дренирующих грунтов, исключающая обогревающее воздействие атмосферных осадков на грунты основания земляного полотна.

Материалы и методы исследования

Рассмотрим схему обогревающего воздействия атмосферных осадков на многолетне-мерзлые грунты основания земляного полотна. На представленной схеме (рис. 3) проиллюстрирован механизм формирования чаши протаивания, при котором положение верхней границы мерзлых грунтов претерпевает локальное понижение непосредственно под насыпью. В отличие от связных грунтов, препятствующих влагопереносу, высокая водопроницаемость насыпи из крупнообломочных грунтов способствует свободной миграции дождевых вод. Механизм обогревающего воздействия реализуется посредством инфильтрации атмосферных осадков в тело насыпи. Фильтрующаяся вода, обладая высокой удельной теплоемкостью и имея температуру 15–20 °С, резко повышает теплообмен внутри земляного полотна, активизируя передачу теплоты мерзлым грунтам его основания. Это приводит к разбалансированию термодинамического равновесия на верхней границе многолетне-мерзлых грунтов, что способствует их деградации.

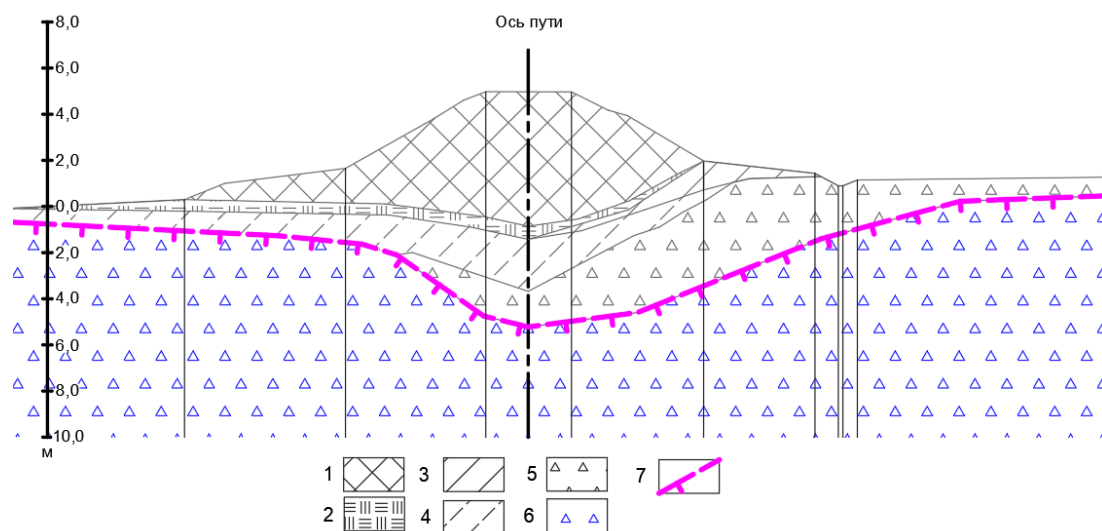


Рис. 2. Инженерно-геологический разрез железнодорожной насыпи:

1 — техногенные насыпные дренирующие грунты; 2 — торфяной слой; 3 — суглинок твердый слаботорфованный; 4 — супесь щебенистая пластичная; 5 — дресвяный грунт с супесчаным заполнителем; 6 — дресвяный грунт с супесчаным заполнителем мерзлый слаболистый, при оттаивании текучей консистенции; 7 — верхняя граница многолетне-мерзлых грунтов

Принципиально иная картина наблюдается на участках насыпей, сложенных из связанных (недренирующих) грунтов, характеризующихся низкими значениями коэффициента фильтрации (рис. 4). В таких условиях возможность инфильтрации атмосферных осадков через тело земляного полотна практически исключена, вследствие чего инфильтрационная составляющая теплопереноса, обусловленная миграцией теплой воды, сводится к минимуму. Теплообмен в системе «насыпь – основание» реализуется преимущественно посредством кондуктивного механизма, описываемого классическими уравнениями теплопроводности с использованием нормативных теплофизических характеристик грунтов.

При возведении насыпи происходит нарушение естественного растительно-мохового покрова и неизбежно изменяется естественный теплообмен. Тем не менее в условиях отсутствия инфильтрации атмосферных осадков в тело земляного полотна доминирующим фактором, способствующим поднятию границы мерз-

лых грунтов, становится экранирующий эффект самого тела насыпи из недренирующего грунта. Как следствие, граница вечной мерзлоты не опускается, а напротив, поднимается и входит в тело насыпи (см. рис. 4), что подтверждается традиционными теплофизическими расчетами, где коэффициент теплопроводности грунтов земляного полотна задается в соответствии с их нормативными характеристиками.

Существующие подходы к описанию теплофизической картины теплопереноса внутри земляного полотна пока не позволяют удовлетворительно решить вопрос, связанный с отепляющим воздействием атмосферных осадков на грунты его основания. Например, в работе [8] приведено математическое описание процессов тепломассопереноса в рамках механики сплошных сред, учитывающее фильтрационное воздействие осадков на понижение границы многолетне-мерзлых грунтов в естественных условиях. Результаты численных расчетов, выполненных в одномерной постановке, показали существенное влияние



Рис. 3. Схема отепляющего воздействия атмосферных осадков для насыпи из дренирующего грунта:
1 – летние осадки

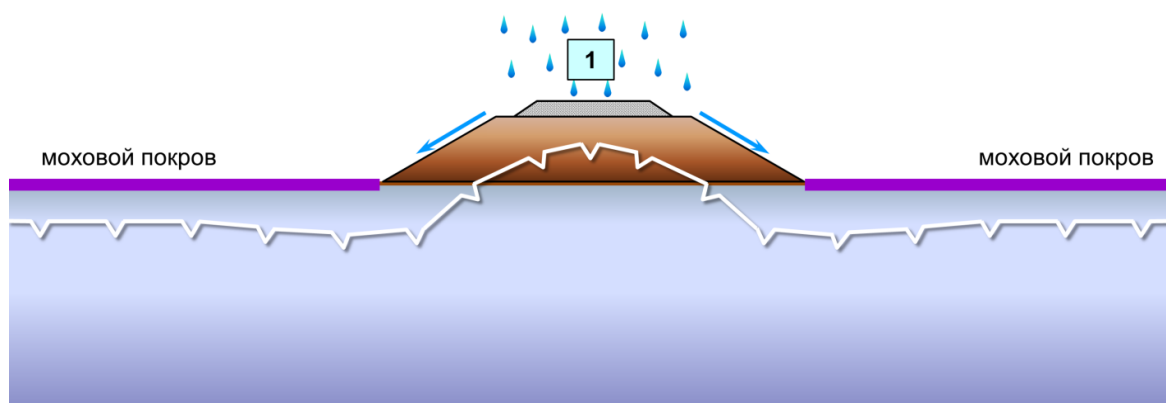


Рис. 4. Схема отепляющего воздействия атмосферных осадков для насыпи из недренирующего грунта:
1 – летние осадки

скорости выпадения осадков на скорость протаивания многолетне-мерзлых грунтов. Однако данное решение, вследствие своей идеализации, не позволяет использовать его для практической оценки в реальных условиях.

Существующие попытки решить этот вопрос путем корректировки температурного режима поверхности земляного полотна, непосредственно контактирующей с летними осадками, как это сделано, например, в [9], не являются удачными. Таким путем добиться соответствия результатов расчета с реальными профилями границы опускания многолетне-мерзлых грунтов (см. рис. 2) не удастся.

В данной работе предлагается гипотеза для решения этой проблемы путем введения дополнительной составляющей в суммарный коэффициент теплопроводности дренирующего грунта земляного полотна – инфильтрационной теплопроводности. Как известно, классическая теплопроводность среды складывается из трех основных составляющих: кондуктивной проводимости, радиационной теплопроводности и конвективного переноса тепла [10–12]. Однако применительно к рассматриваемому случаю – насыпи из дренирующих грунтов – добавляется еще один вид переноса тепла, а именно инфильтрация летних осадков в тело земляного полотна. Поэтому выглядит обоснованным введение в традиционную формулу определения коэффициента теплопроводности талого грунта дополнительного слагаемого, количественно характеризующего отепляющее воздействие атмосферных осадков:

$$\lambda_{th} = \lambda_{eff} + \lambda_{conv} + \lambda_{inf}, \quad (1)$$

где $\lambda_{eff} = \lambda_{cond} + \lambda_{rad}$ – эффективная теплопроводность; λ_{cond} – кондуктивная теплопроводность; λ_{rad} – радиационная теплопроводность; λ_{conv} – конвективная теплопроводность; λ_{inf} – инфильтрационная теплопроводность.

Здесь важно отметить, что инфильтрационная теплопроводность, как и конвективная, не является фундаментальным свойством грунта, в отличие от кондуктивной. Поэтому рассчитывать на точность количественного определения величины λ_{inf} не приходится. Тем не менее качественный анализ инфильтрационной теплопроводности, приведенный ниже, позволяет судить о реальности этого фактора при рассмотрении теплофизической картины в теле земляного полотна, сложенного дренирующими грунтами.

Тепло, переносимое летними осадками внутри земляного полотна, можно оценить как

$$Q_{inf} = C_w \rho_w V \Delta T, \quad (2)$$

где C_w – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·°C); ρ_w – плотность воды, кг/м³; V – средняя за лето объемная скорость фильтрации атмосферной воды, м/с; ΔT – разница между средней температурой осадков (поверхности) и температурой грунта у подошвы насыпи, °C.

Наиболее важным параметром здесь является так называемая объемная скорость фильтрации, которая определяется выражением

$$V = f V_{max}, \quad (3)$$

где f – коэффициент инфильтрационного питания; $V_{max} = h_{летн}/t_{летн}$ – потенциальная скорость инфильтрации, м/с; $h_{летн}$ – суммарное количество летних осадков, м; $t_{летн}$ – продолжительность летнего периода, с.

С другой стороны, по аналогии с законом Фурье инфильтрационный перенос тепла можно представить в интегральном виде следующим образом:

$$Q_{inf} = \lambda_{inf} \frac{\Delta T}{H}, \quad (4)$$

где H – высота насыпи, м.

Приравняв правые части выражений (2) и (4), получим формулу для определения инфильтрационной теплопроводности:

$$\lambda_{inf} = C_w \rho_w V H. \quad (5)$$

Наиболее важным параметром здесь является так называемая объемная скорость фильтрации. Она зависит от слишком многих факторов, чтобы ее можно было реально определить априори. Если с величиной V_{max} все ясно, то с коэффициентом f , определяющим фактическую объемную скорость фильтрации V через толщу земляного полотна H , полная неоднозначность. И это понятно, поскольку здесь накладывается большое количество неопределенных факторов, таких как испарение, задержка воды в теле насыпи, изменение направления фильтрации, неоднородность грунта земляного полотна и т. д. Из формулы (5) видно, что λ_{inf} прямо пропорционально зависит от высоты насыпи H . Но это не означает, что чем выше насыпь, тем больше λ_{inf} , поскольку в формуле присутствует еще один сомножитель V , который обратно пропорционален величине H .

Таким образом, очевидно, что реалистичная априорная оценка коррекции инфильтрации невозможна. Для оценки неопределен-

ного параметра, которым в данном случае является суммарный коэффициент теплопроводности грунта в талом состоянии λ_{th} , может быть использован эмпирический подход. Для этого необходимо подобрать значение λ_{th} , которое соответствует фактической конфигурации верхней границы многолетне-мерзлых грунтов в основании насыпи согласно результатам инженерно-геологических изысканий. Определенный таким образом коэффициент теплопроводности λ_{th} затем может быть использован в дальнейших расчетах применительно к аналогичным условиям.

Для иллюстрации предложенной гипотезы об учете теплопередачи при проникновении атмосферных осадков в тело земляного полотна была использована специализированная программа Freeze-Cold [13], главные особенности которой состоят в следующем:

- снежные отложения, растительно-моховой покров, пенополистирол и т. д. задаются не их термическими коэффициентами, а реальными геометрическими параметрами и среднемесячными значениями их теплофизических характеристик;

- предусмотрена возможность разбиения поперечного сечения земляного полотна на

зоны с учетом или без учета сезонной инфильтрации атмосферных осадков;

- граница мерзлых грунтов определяется не изотермой температуры замерзания грунта, а условием фазовых переходов при замерзании или оттаивании воды в порах грунта.

Результаты исследования

В качестве базового объекта теплофизических расчетов была взята железнодорожная насыпь высотой 3 м, сложенная из дренирующего грунта – галечника, с типичными для восточной части БАМа параметрами. Грунт основания – суглинок. Температура на глубине нулевых годовых амплитуд (15 м) принималась равной $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Климатические характеристики сведены в табл. 1, 2; физико-механические характеристики грунтов и мха приведены в табл. 3, 4.

Ниже приведены результаты теплофизических расчетов, иллюстрирующие этапы сооружения земляного полотна второго пути, начиная со строительства насыпи первого пути.

Первый этап. Стабилизация границы мерзлых грунтов в основании насыпи из дренирующих грунтов через 30 лет после ее сооружения. На рис. 5 показан результат моделирования температурного режима грунтов

Таблица 1

Среднемесячная температура воздуха

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Температура, $^{\circ}\text{C}$	-27,5	-23,1	-13,1	-5,0	8,6	15,3	18,0	14,9	7,4	-3,5	-18,6	-27,0

Таблица 2

Теплофизические характеристики снега

Параметр	Месяц						
	X	XI	XII	I	II	III	IV
Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	180	220	230	250	270	320	400
Теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$	0,12	0,15	0,16	0,18	0,20	0,27	0,40

Таблица 3

Физико-механические характеристики грунтов

Тип грунта	Плотность частиц грунта ρ_s , $\text{кг}/\text{м}^3$	Коэффициент пористости e	Влажность W	Коэффициент теплопроводности талого грунта λ_{th} , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$	Коэффициент теплопроводности мерзлого грунта λ_f , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$	Удельная теплоемкость частиц грунта C_s , $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$
Галечник (насыпь)	2 700	0,5	0,05	3,0	1,8	930
Суглинок (основание насыпи)	2 700	0,6	0,2	1,33	1,5	900

Расчетные характеристики растительно-мохового покрова

Тип грунта	Плотность ρ , кг/м ³	Влажность W	Коэффициент теплопроводности талого грунта λ_{th} , Вт/(м·°C)	Коэффициент теплопроводности мерзлого грунта λ_f , Вт/(м·°C)	Удельная теплоемкость талого грунта C_{th} , Дж/(кг·°C)	Удельная теплоемкость мерзлого грунта C_f , Дж/(кг·°C)
Мох	150	2,0	0,15	0,63	3 600	2 200

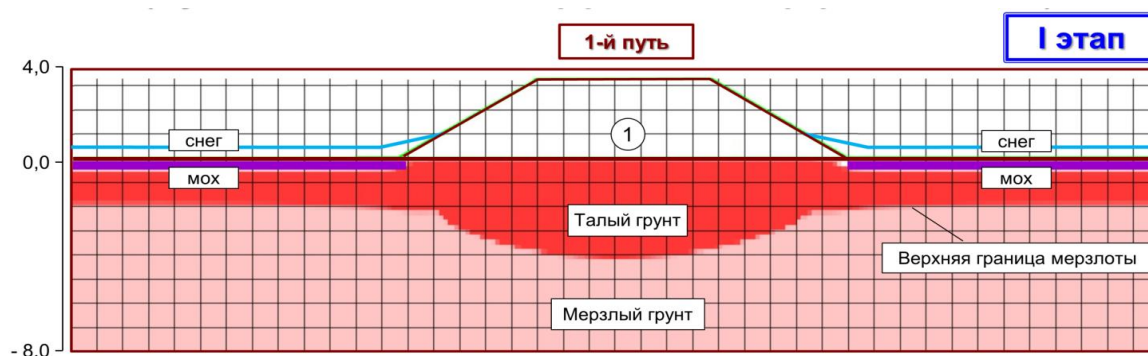


Рис. 5. Поле объемной влажности грунта насыпи из дренирующего грунта на 30-й год (конец сентября) с учетом тепляющего действия атмосферных осадков:

1 – зона инфильтрации атмосферных осадков

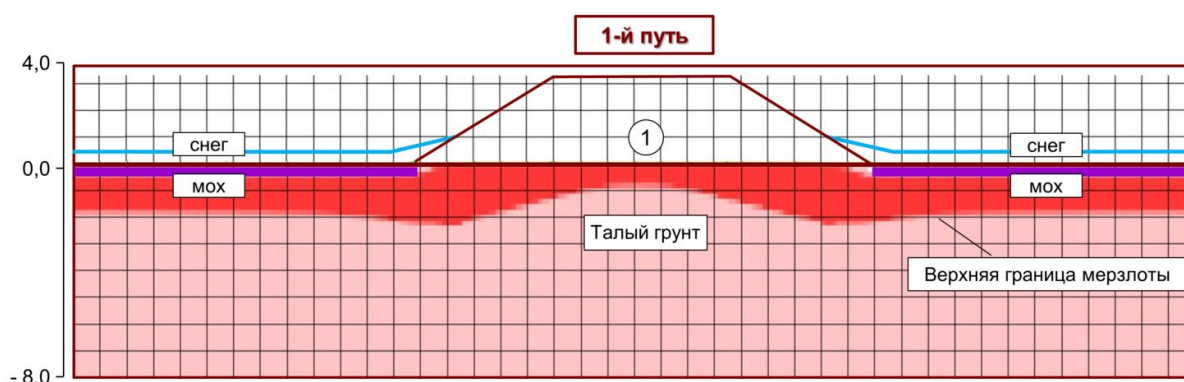


Рис. 6. Поле объемной влажности грунта насыпи из дренирующего грунта на 10-й год (конец сентября) без учета тепляющего действия атмосферных осадков:

1 – зона без учета инфильтрационной теплопроводности

основания и 3-метровой насыпи, сложенной дренирующим грунтом. В данном расчете коэффициент теплопроводности дренирующего грунта принят с учетом тепляющего воздействия фильтрующихся в теле насыпи атмосферных осадков. Стабилизация температурного поля, а соответственно, и верхней границы мерзлых грунтов произошла на 30-й год. Глубина оттаивания мерзлых грунтов под насыпью стабилизировалась на уровне 4 м. Полученный эффект достигнут посредством задания летнего коэффициента теплопроводности дренирующего грунта (см. табл. 3), который характеризует эффект фильтрации атмосферной воды в теле насыпи. Суммарный

летний коэффициент теплопроводности талого грунта, равный 3 Вт/(м·°C), получен с учетом коэффициента инфильтрационной теплопроводности, подобранного эмпирическим путем и принятого равным 1,2 Вт/(м·°C).

Для сравнения на рис. 6 приведен аналогичный расчет, где летний коэффициент теплопроводности был взят в соответствии с нормативным значением для дренирующего грунта, равным 1,8 Вт/(м·°C), без учета инфильтрационной составляющей.

На рис. 6 видно, что при отсутствии инфильтрационной составляющей в летнем коэффициенте теплопроводности дренирующего грунта насыпи верхняя граница мерз-

лоты под насыпью не опускается, а напротив, поднимается вверх и стремится войти в тело земляного полотна. Аналогичный результат может быть получен, если в нижней части насыпи из дренирующего грунта уложить слой из связного (недренирующего) грунта. Как было показано в [13], достаточная толщина слоя такого грунта, выполняющего функцию гидроизоляции, предотвращающего отепляющее воздействие атмосферных осадков на основание земляного полотна, может быть ограничена 1 м.

На **втором этапе** уширение существующего земляного полотна под второй путь предусматривается из дренирующего грунта. Для ограничения фильтрации атмосферных осадков выполняется устройство гидроизоляционного экрана – двухслойного противофильтрационного полотна (геомембраны с двусторонним термоскрепленным геотекстилем). Геокомпозит укладывается по низу выравнивающего или защитного слоя на глубине не менее 0,5 м от основной площадки с уклоном 0,04 в полевую сторону от оси пути.

На рис. 7 показан результат теплофизического расчета состояния грунта насыпи и ее

основания на второй год после сооружения второго пути.

Анализ состояния грунтов основания на втором этапе показывает, что массив талого грунта не увеличился после уширения насыпи, а в месте сопряжения с существующим земляным полотном даже уменьшился.

На **третьем этапе** предусматривается укладка геокомпозита в верхней части насыпи первого главного пути с целью предотвращения деградации многолетне-мерзлых грунтов в основании земляного полотна существующего пути и под его правым откосом. Работы выполняются по аналогии с устройством экрана на втором пути – геокомпозит размещается по низу защитного или выравнивающего слоя также на глубине не менее 0,5 м под основной площадкой. Данное мероприятие реализуется после завершения строительства второго главного пути и переключения на него движения поездов, оно может быть выполнено как в рамках реконструкции, так и во время ближайшего капитального ремонта первого пути.

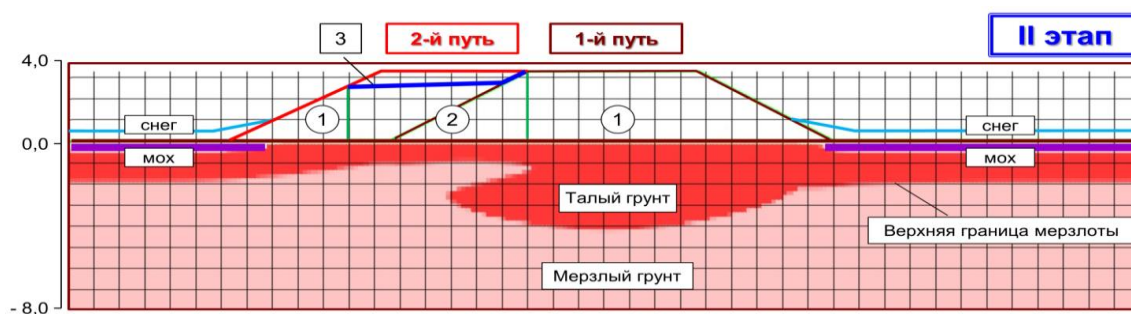


Рис. 7. Поле объемной влажности грунта насыпи из дренирующего грунта через два года после строительства второго пути (конец сентября):

1 – зона инфильтрации атмосферных осадков; 2 – зона, защищенная от инфильтрации атмосферных осадков; 3 – гидроизоляционный экран

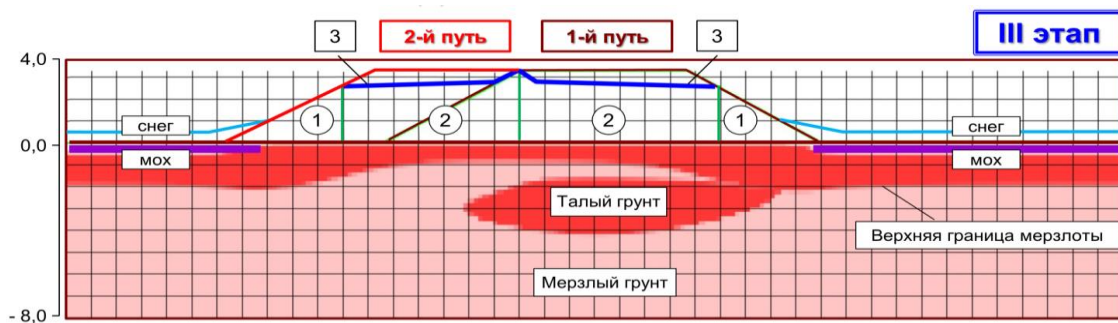


Рис. 8. Поле объемной влажности грунта двухпутной насыпи из дренирующего грунта через три года после укладки гидроизоляционного экрана под первым путем (конец сентября):

1 – зона инфильтрации атмосферных осадков; 2 – зона, защищенная от инфильтрации атмосферных осадков; 3 – гидроизоляционный экран

Как хорошо видно на рис. 8, уже через три года после укладки гидроизоляционного экрана под первым путем граница мерзлоты в основании основной насыпи начала подниматься вверх, оставив небольшую область талого грунта. Еще через полгода, к концу зимы, область талого грунта будет представлять собой талик, окруженный мерзлым грунтом (рис. 9).

В дальнейшем талик медленно сокращается в размерах, с тенденцией к полному исчезновению. В качестве иллюстрации на рис. 10 показана картина на конец зимы через восемь лет после укладки гидроизоляционного экрана под первым путем.

На рис. 11 приведено температурное поле двухпутной насыпи с гидроизоляционным экраном, демонстрирующее эффект промора-

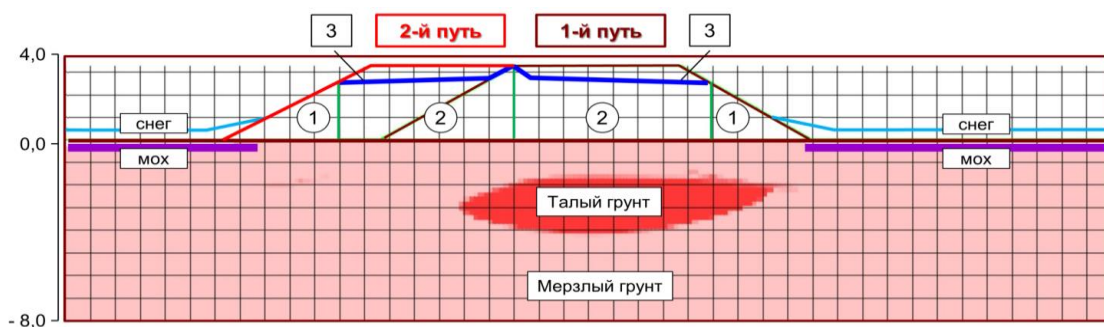


Рис. 9. Поле объемной влажности грунта двухпутной насыпи из дренирующего грунта через три года после укладки гидроизоляционного экрана под первым путем (конец марта): 1 – зона инфильтрации атмосферных осадков; 2 – зона, защищенная от инфильтрации атмосферных осадков; 3 – гидроизоляционный экран

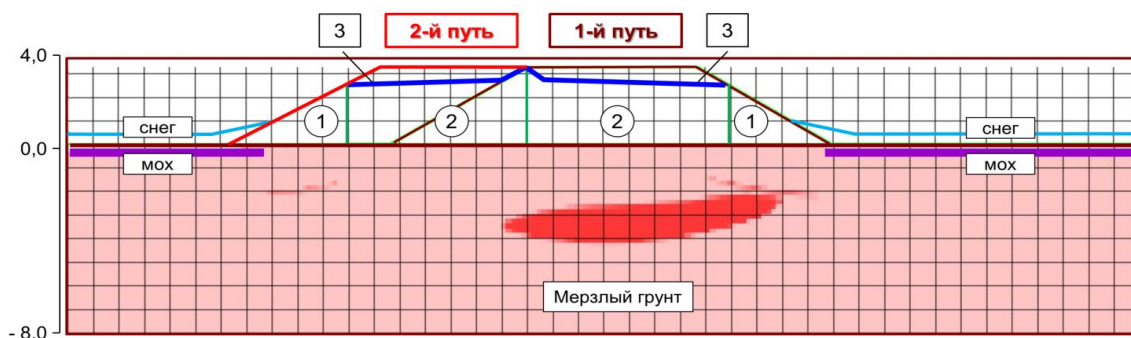


Рис. 10. Поле объемной влажности грунта двухпутной насыпи из дренирующего грунта через восемь лет после укладки гидроизоляционного экрана под первым путем (конец марта): 1 – зона инфильтрации атмосферных осадков; 2 – зона, защищенная от инфильтрации атмосферных осадков; 3 – гидроизоляционный экран

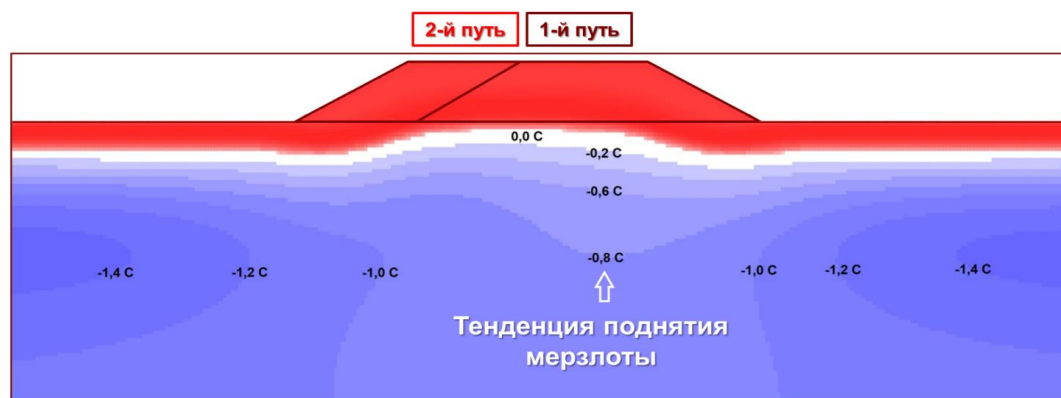


Рис. 11. Температурное поле двухпутной насыпи из дренирующего грунта через восемь лет после укладки гидроизоляционного экрана под первым путем (конец сентября)



Рис. 12. Геомембрана с двусторонним термоскрепленным геотекстилем на БАМе

живания основания земляного полотна под насыпью первого пути.

На рис. 12 приведена иллюстрация геомембраны с двусторонним термоскрепленным геотекстилем. Данный геокомпозит в железнодорожном строительстве применяется в качестве гидроизолирующего слоя в основании насыпи для обеспечения сбора поверхностного стока и отвода его в водоотводные лотки на нулевых местах, в водоохранных зонах.

Таким образом, вышеприведенные расчеты, описывающие характер изменения состояния грунтов основания при сооружении насыпи второго пути из дренирующих грунтов, наглядно показали эффективность предложенной технологии с использованием гидроизоляционных экранов. Однако необходимо отметить, что эффективность данного конструктивного решения может быть обеспечена только в случае наличия водоотводных сооружений, содержащихся в надлежащем состоянии. В случае необеспечения надежного водоотвода от насыпи вода,

фильтрующаяся через откосную часть, будет аккумулироваться у подошвы насыпи и впоследствии дренировать в грунты основания.

Выводы

В статье обоснована гипотеза о возможности моделирования утепляющего воздействия атмосферных осадков на грунты основания земляного полотна из дренирующих грунтов путем введения понятия инфильтрационной теплопроводности.

Предложена и обоснована расчетным путем технологическая схема сооружения насыпей из дренирующих грунтов под вторые пути, обеспечивающая исключение утепляющего воздействия атмосферных осадков на грунты основания земляного полотна. Отличительной особенностью схемы является поэтапная укладка гидроизоляции в верхней части как вновь возводимого, так и существующего земляного полотна, способствующая восстановлению мерзлого состояния грунта под эксплуатируемым путем.

Список источников

1. Ашпиз Е. С. Опыт проектирования земляного полотна железных дорог России, расположенных в зоне распространения многолетне-мерзлых грунтов // Материалы Пятой конференции геокриологов России. Москва : Университетская книга, 2016. С. 162–168.
2. Гаврилов И. И. Состояние и причины повышенной деформативности земляного полотна на участках распространения многолетне-мерзлых грунтов Дальнего Востока и Забайкалья // Проектирование развития региональной сети железных дорог. 2013. № 1. С. 129–143.

3. Сазонов В. Н., Ашпиз Е. С. Актуальные проблемы обеспечения надежности земляного полотна на Восточном полигоне // Железнодорожный транспорт. 2015. № 9. С. 28–31.
4. Melnikov A., Gavrilov I., Zhang Z. Permafrost railroads of Eastern Siberia and the Russian far east: types and causes of contemporary deformations // Innovative Infrastructure Solutions. 2024. Vol. 9, No. 5. P. 155.
5. Melnikov A., Zhang Z., Gagarin L. Effects of extreme atmospheric precipitation on the stability of railways in the permafrost zone // Modeling Earth Systems and Environment. 2024. Vol. 10, No. 1. P. 1305–1320.
6. Исаков А. Л., Устьян Н. А. Проблемы деградации вечной мерзлоты в основании земляного полотна железных дорог и пути ее решения на базе теплотехнических расчетов // Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике. Салехард, 2021. С. 177–180.
7. Исаков А. Л., Моисеева И. С., Гудкова И. Н. Обоснование конструктивных особенностей земляного полотна из дренирующих грунтов в криолитозоне с помощью теплотехнических расчетов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 1 (73). С. 95–103. DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_95.
8. Алейников А. С., Петрова А. Г. Численное решение задачи протаивания мерзлого грунта с учетом инфильтрации осадков // Известия Алтайского государственного университета. 2017. № 4 (96). С. 72–77.
9. Гарагуля Л. С. Методика прогнозной оценки антропогенных изменений мерзлотных условий (на примере равнинных территорий). Москва : Издательство МГУ, 1985. 224 с.
10. Wong H. The basic formulas and data on heat transfer for engineers. Москва : Атомиздат, 1979. 185 с.
11. Цветков Ф. Ф., Григорьев Б. А. Тепломассообмен. Москва : МЭИ, 2011. 562 с.
12. Côté J., Fillion M. H., Konrad J. M. Estimating hydraulic and thermal conductivities of crushed granite using porosity and equivalent particle size // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2011. Vol. 137, No. 9. P. 834–842.
13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU2021611121. Программа расчета температуры вечномерзлых грунтов земляного полотна «Freeze-Cold» / Машуков В. И., Исаков А. Л. 2021.

References

1. Ashpiz E. S. Experience in designing the subgrade of Russian railways located in the permafrost zone. *Proceedings of the Fifth Conference of Geocryologists of Russia*. Moscow: Universitetskaya kniga; 2016. P. 162–168. (In Russ.).
2. Gavrilov I. I. The state and causes of increased deformability of the earthbed in areas of permafrost distribution in the Far East and Transbaikalia. *Designing the Development of a Regional Railway Network*. 2013;(1):129–143. (In Russ.).
3. Sazonov V. N., Ashpiz E. S. Actual problems of ensuring the reliability of the roadbed on the Eastern polygon. *Railway Transport*. 2015;(9):28–31. (In Russ.).
4. Melnikov A., Gavrilov I., Zhang Z. Permafrost railroads of Eastern Siberia and the Russian far east: types and causes of contemporary deformations. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2024;9(5):155.
5. Melnikov A., Zhang Z., Gagarin L. Effects of extreme atmospheric precipitation on the stability of railways in the permafrost zone. *Modeling Earth Systems and Environment*. 2024;10(1):1305–1320.
6. Isakov A. L., Ustyan N. A. Problems of permafrost degradation in the base of the railway subgrade and ways to solve it based on heat engineering calculations. *Modern Studies of the Transformation of the Cryolithic Zone and Issues of Geotechnical Safety of Structures in the Arctic*. Salekhard; 2021. P. 177–180. (In Russ.).
7. Isakov A. L., Moiseeva I. S., Gudkova I. N. Justification of the subgrade design features from draining soils in the cryolithic zone using heat engineering calculations. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(73):95–103. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_95.
8. Aleynikov A., Petrova A. Numerical Analysis of Frozen Soil Thawing under the Influence of Rainwater Infiltration. *Izvestiya of Altai State University*. 2017;(96):72–77.
9. Garagulya L. S. Methodology for predictive assessment of anthropogenic changes in permafrost conditions (on the example of flat territories). Moscow: Moscow State University Publishing House; 1985. 224 p. (In Russ.).
10. Wong H. The basic formulas and data on heat transfer for engineers. Moscow: Atomizdat; 1979. 185 p.
11. Tsvetkov F. F., Grigoriev B. A. Heat and mass transfer. Moscow: Moscow Power Engineering Institute; 2011. 562 p. (In Russ.).
12. Côté J., Fillion M. H., Konrad J. M. Estimating hydraulic and thermal conductivities of crushed granite using porosity and equivalent particle size. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2011;137(9):834–842.
13. Mashukov V. I., Isakov A. L. Certificate of state registration of the computer program: RU2021611121. Program for calculating the temperature of permafrost soils of the subgrade Freeze-Cold. 2021. (In Russ.).

Информация об авторах

А. Л. Исаков – доктор технических наук, профессор кафедры «Изыскания, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог» Сибирского государственного университета путей сообщения.

И. С. Моисеева – аспирант кафедры «Изыскания, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

A. L. Isakov – Doctor of Engineering, Professor of the Surveying, Design and Construction of Railways and Motorways Department, Siberian Transport University.

I. S. Moiseeva – Postgraduate of the Surveying, Design and Construction of Railways and Motorways Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 05.05.2026; одобрена после рецензирования 08.05.2026; принята к публикации 15.05.2026.

The article was submitted 05.05.2026; approved after reviewing 08.05.2026; accepted for publication 15.05.2026.

Научная статья
УДК 624.011.78
doi:10.52170/1815-9265_2026_79_114

Моделирование и оценка экономической эффективности полимерных композитных материалов при ремонте проезжей части мостов

Тимофей Михайлович Баранов^{1✉}, Диана Валеохмадовна Хамидулина²

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

¹ baranov-87@yandex.ru✉

² khamidulinadiana@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматриваются перспективы применения полимерных композитных материалов для реконструкции проезжей части городских мостов. В Иркутске находится ряд мостов, имеющих пониженную грузоподъемность и недостаточный ресурс долговечности за счет нарушения гидроизоляционных слоев мостового полотна и связанных с этим повреждений несущих элементов. Примером таких сооружений могут служить мосты со сталежелезобетонными пролетными строениями. Применение композитных материалов при капитальном ремонте подобных пролетных строений в качестве несущих конструкций проезжей части позволит повысить их грузоподъемность, исключить необходимость устройства гидроизоляционного слоя проезжей части, тем самым уменьшить затраты на само полотно и его последующие ремонты в течение всего срока службы. Результаты работы можно применить и для других городских мостов, в том числе новых.

В статье выполнен анализ ключевых преимуществ полимерных композитных материалов, а также основных ограничений их применения. Также приведены данные, демонстрирующие снижение эксплуатационных затрат на содержание мостов из полимерных композитных материалов по сравнению с железобетонными. Так, срок окупаемости 1 м² композитной плиты проезжей части составляет примерно 35 лет, что приблизительно равно 1,5 нормативным периодам капитального ремонта гидроизоляции.

С помощью программного комплекса MIDAS Civil 2022 была разработана конечно-элементная модель пролетного строения путепровода с плитой проезжей части из композитных материалов. Расчеты подтвердили возможность совместной работы композитной плиты и стальных балок; материал плиты и стальных балок отвечает требованиям нормативных документов.

Ключевые слова: полимерные композитные материалы, мостовые конструкции, реконструкция мостов, эксплуатационные расходы на содержание мостов, гидроизоляция проезжей части

Для цитирования: Баранов Т. М., Хамидулина Д. В. Моделирование и оценка экономической эффективности полимерных композитных материалов при ремонте проезжей части мостов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 2 (79). С. 114–126. DOI 10.52170/1815-9265_2026_79_114.

Original article

Modeling and evaluation of the economic efficiency of polymer composite materials in bridge deck repair

Timofey M. Baranov^{1✉}, Diana V. Khamidulina²

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

¹ baranov-87@yandex.ru✉

² khamidulinadiana@yandex.ru

Abstract. This article examines the prospects of using polymer composite materials (PCMs) for bridge deck reconstruction. Irkutsk city contains a number of bridges characterized by reduced load-carrying capacity and insufficient durability, resulting from damage to the waterproofing layers of the bridge deck and the consequent deterioration of the load-carrying elements. Bridges with steel-reinforced concrete superstructures serve as examples of such structures. Employing polymer composite materials in the rehabilitation of superstructures, specifically as load-bearing roadway components, enhances their load-carrying capacity; this approach eliminates the necessity of a separate waterproofing layer, thereby reducing both the initial cost of the deck and expenses for its maintenance and repairs. The results of the work can also be applied to other urban bridges, including new ones.

The article analyzes the key advantages of polymer composite materials, as well as the primary limitations on their application. It also provides data demonstrating the reduction in operating costs for the maintenance of bridges utilizing polymer composite materials compared to reinforced concrete. For instance, the payback period for

1 square meter of composite roadway slab is approximately 35 years, which is roughly equivalent to 1.5 standard periods of waterproofing major repairs.

Using the MIDAS Civil 2022 software package, a finite element model of the overpass superstructure with a composite roadway slab was developed. Calculations confirmed the feasibility of the integrated behavior of the composite slab and steel beams; the material of the slab and steel beams meets the requirements of regulatory standards.

Keywords: polymer composite materials, bridge structures, bridge reconstruction, operational costs of PCM bridges, bridge waterproofing

For citation: Baranov T. M., Khamidulina D. V. Modeling and evaluation of the economic efficiency of polymer composite materials in bridge deck repair. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(79):114–126. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_79_114.

Введение

В настоящее время число конструкций, изготовленных из полимерных композитных материалов и применяемых в области транспортного и гражданского строительства, значительно возросло. Актуальность научно-исследовательской работы обусловлена возможностью увеличения долговечности конструкций эксплуатируемых городских мостов с металлическими или сталежелезобетонными пролетными строениями и снижения эксплуатационных затрат на ремонт мостового полотна за счет отсутствия необходимости устройства гидроизоляционного слоя, полной водонепроницаемости поликомпозиционной плиты и ее устойчивости к солям.

В Иркутске находится ряд мостов, имеющих пониженную грузоподъемность и низкий остаточный ресурс долговечности. Примером может служить путепровод со сталежелезобетонными пролетными строениями. Применение композитных материалов при капитальном ремонте данного путепровода в качестве несущих конструкций плиты проезжей части позволит повысить его грузоподъемность, исключить необходимость устройства гидроизоляционного слоя проезжей части, тем самым уменьшить затраты на само полотно и его последующие ремонты. Результаты работы можно применить и для других городских мостов, в том числе для проектируемых сооружений.

Интеграция в совместную работу конструкций из полимерных композитных материалов со стальными пролетными строениями позволит достичь экономии за счет сокращения расхода стального материала по сравнению с вариантом без совместной работы плиты и балок.

Материалы и методы исследования

Композитные материалы на сегодняшний день уже нашли широкое применение в области транспортного строительства. В мировой практике известно более 360 мостов, в состав

которых включены конструкции из композитных материалов, в том числе 53 – с цельнокомпозитными пролетными строениями [1].

К числу наиболее известных примеров применения композитных материалов в конструкции мостового перехода относится пешеходный мост в г. Аберфельди, являющийся первым в мире полностью «пластиковым» мостом (рис. 1). Конструкция представляет собой трехпролетный вантовый мост с центральным пролетом 63 м и двумя боковыми пролетами по 25 м, высота пилона – 17 м. Еще одним примером мостов, спроектированных под пешеходную нагрузку, является цельнокомпозитный мост в г. Ллейда, Испания (рис. 2) с центральным арочным пролетом расчетной длиной 38 м и высотой арки 6,2 м. Оба моста запроектированы на временные вертикальные нагрузки в 5 кПа.

Говоря об опыте применения композитных материалов, нельзя не упомянуть об их применении в отечественном мостостроении, которое демонстрирует возможности таких технологий в условиях нашего климата. Первый в России мост с цельнокомпозитным пролетом был построен в 2004 г. в Чертанове (Москва) по заказу ОАО «РЖД» – трехпролетный пешеходный мост полной длиной 41 м, с центральным пролетом в 13 м, спроектированный под нагрузку 4 кПа (рис. 3).

Применение композитных материалов не ограничивается одной лишь пешеходной инфраструктурой. В России имеются успешные примеры автодорожных и железнодорожных мостов с несущими конструкциями, целиком выполненные из полимерных композитных материалов (ПКМ). Так, в 2014 г. в Новосибирске был построен первый и на данный момент единственный в России автодорожный мост с пролетными строениями из композитных материалов, с расчетным пролетом длиной 17,62 м. Однопролетный балочный мост с пролетным строением из композитных ферм системы Тауна



Рис. 1. Пешеходный мост в Аберфельди [2]



Рис. 2. Пешеходный мост из стеклопластика в г. Ллейда [3]

с железобетонной плитой проезжей части, включенной в совместную работу (рис. 4) под временные нагрузки А-14 и Н-14 [4]. Этот пример является подтверждением возможности применения ПКМ в несущих конструкциях автодорожных мостов.

В 2019 г. был построен первый в мире железнодорожный мост с цельнокомпозитным пролет-

ным строением балочной системы со сплошной стенкой, с расчетным пролетом 11,5 м под нормативную нагрузку С-14 [4] (рис. 5).

Полимерные композитные материалы представляют собой искусственно созданные структуры, состоящие из нескольких компонентов – полимерной матрицы и армирующих наполнителей.



Рис. 3. Первый в России мост с цельнокомпозитным пролетом



Рис. 4. Автомобильный мост через р. Пашенку в Новосибирской области



Рис. 5. Первый в мире цельнокомпозитный железнодорожный мост [5]

Армирующие наполнители составляют от 30 % до 70 % от объема и 50 % от их веса. Основная их функция – восприятие нагрузки и обеспечение жесткости, термической устойчивости и прочих структурных свойств материала. Для эффективного восприятия механических нагрузок армирующие наполнители должны иметь высокий модуль упругости, обладать высоким пределом прочности, низким разбросом прочности между волокнами, высокой стабильностью своей прочности во время обработки, а также высокой однородностью диаметра и размера поверхности.

Матрица обеспечивает положение и ориентацию волокон, защиту от повреждений в процессе изготовления и обработки, долговечность композита, а также защиту от воздействия окружающей среды. Кроме того, она отвечает за распределение нагрузок на отдельные волокна [6, 7].

Путем целенаправленного комбинирования полимерных матриц и армирующих наполнителей могут быть созданы материалы с заданным комплексом свойств.

Данные материалы обладают рядом отличительных особенностей в сравнении с традиционно используемыми железобетоном и сталью:

1) более высокая прочность при растяжении. На рис. 6 показано сравнение прочностных и деформационных характеристик ПКМ, обычной и высокопрочной стали для армирования железобетона;

2) устойчивость к воздействию влаги, химических реагентов и других агрессивных сред, что обуславливает долговечность конструкций, выполненных из них. По данной

причине применение конструкции с композитами в составе позволяет значительно сократить эксплуатационные расходы;

3) неустойчивость к солнечной радиации, композитные материалы сами по себе не являются огнестойкими, имеют ярко выраженную анизотропию свойств и склонность к хрупкому разрушению [8], о чем свидетельствует отсутствие площадок текучести на рис. 6. Определенная анизотропия прослеживается при деформации растяжения-сжатия. При сжатии конструкций из полимерных композитных материалов сами волокна склонны к потере местной устойчивости. На рис. 7 представлены основные механизмы разрушения конструкций из композитных материалов при их сжатии.

Также из-за небольшой зоны текучести данный материал лучше включать в совместную работу со сталью, а не применять независимо [8, 9]. Известно, что для полимерных композитных материалов характерно хрупкое разрушение, что является определенного рода ограничением для их применения в определенных типах конструкций. При проектировании новых конструкций из ПКМ, усиления существующих конструкций из традиционных материалов следует придерживаться первой теории прочности по допускаемым напряжениям в композитном материале в продольном и отдельно поперечном направлении армирующих волокон.

В мостостроении из композитных материалов наиболее распространено применение стеклопластика GFRP. В сравнении с углепластиком CFRP его стоимость значительно меньше при равной экономии на ремонтах в течение жизненного цикла моста. Также стеклопластики

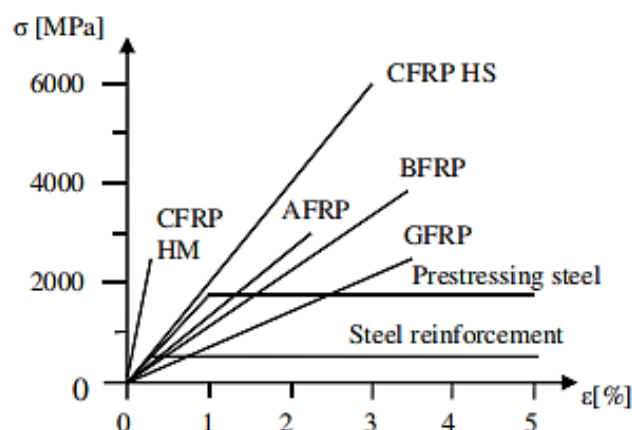


Рис. 6. Диаграмма напряжение – деформация для стали и поликомпонентных материалов: CFRP – углепластик; BFRP – базальтопластик; AFRP – арамидопластик; GFRP – стеклопластик; prestressing steel – напрягаемая арматура; steel reinforcement – арматура [6]

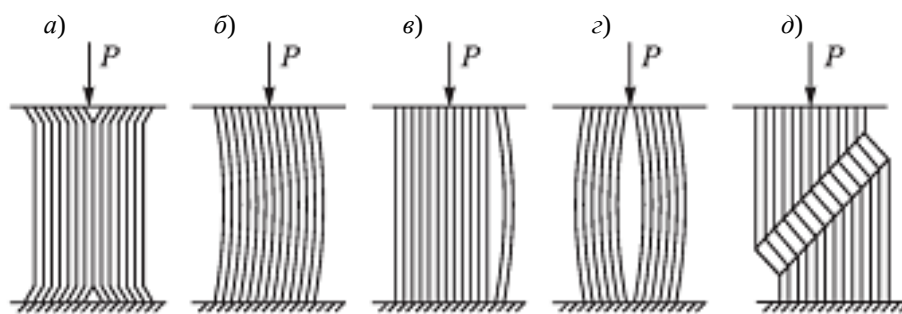


Рис. 7. Возможные механизмы разрушения при сжатии композитных образцов:
а – смятие; б – потеря устойчивости; в – выщелкивание слоев; г – расслоение; д – кинк [10]

обладают меньшим модулем упругости, чем углепластики, что позволяет равномернее перераспределяться концентраторам напряжений в соединениях и узлах конструкции.

В статье [11] А. Н. Иванов, В. С. Кожевников находят применение плитам из ПМК-материалов в железнодорожных мостах и оценивают напряженно-деформированное состояние объединенного пролетного строения. Авторы приходят к выводу, что замена железобетонной плиты на композитную в составе сечения главных балок для железнодорожных мостов вполне возможна, хотя и требует дальнейшей расчетной и конструктивной проработки. Такая проработка в части объединения композитных плит со стальными балками описывается в [12].

Много внимания в мостостроении уделяется применению ПМК-материалов для усиления несущих конструкций [12, 13]. Как правило, композитные материалы выступают в качестве внешнего армирования железобетонных конструкций и укладываются вдоль растянутых волокон.

Результаты исследования и их обсуждение

Защита строительных конструкций от воздействия влаги является одной из основных задач при их проектировании и строительстве, так как гидроизоляция – наиболее уязвимый и ключевой элемент, от которого зависит долговечность всего сооружения. Включение композитных материалов в совместную работу со стальными балками позволяет достичь экономии за счет отсутствия необходимости применения гидроизоляции и эксплуатационных расходов на ее содержание.

В качестве примера применения композитных материалов при капитальном ремонте рассмотрим пролетное строение путепровода в Иркутске. Общий вид сооружения приведен на

рис. 8. Путепровод (схема $18 + 2 \times 34 + 18$ м, балочная разрезная система) имеет сталежелезобетонные пролетные строения из восьми двутавровых главных балок со сплошными стенками, объединенных железобетонной плитой проезжей части и системой связей.

Покрытие проезжей части крайних полос мостового полотна выполнено из асфальтобетона, а междупутья трамвайных путей и примыкающих к ним участков – из железобетонных плит размером $1\,860 \times 1\,400 \times 120$ и $1\,390 \times 680 \times 120$ мм. Одежда ездового полотна состоит из следующих слоев: оклеечная гидроизоляция из мешковины, пропитанной битумом; защитный слой из армированного цементно-песчаного раствора толщиной 3–5 см; песчано-гравийное основание толщиной 14 см; покрытие проезжей части толщиной в среднем 36,5 см.

Обследование и испытания путепровода специалистами СГУПС и ИрГУПС в 2019 г. позволили сделать следующие выводы:

- недостаточное включение железобетонной плиты проезжей части в совместную работу с главными балками, т. е. несущими конструкциями являются только металлические части пролетного строения, что ограничивает грузоподъемность путепровода и влияет на движение городского транспорта;

- наблюдается развитие повреждений, связанных с нарушением гидроизоляции, таких как выщелачивание цементного камня на нижней поверхности плиты (рис. 9, а) и коррозия главных балок (см. рис. 9, б), дополнительно снижающих ресурс сооружения.

Для восстановления эксплуатационных показателей городского путепровода предлагается полная замена мостового полотна и всей железобетонной плиты проезжей части на единую поликомпозиционную конструкцию (рис. 10). Это решение призвано упростить и

а)



б)

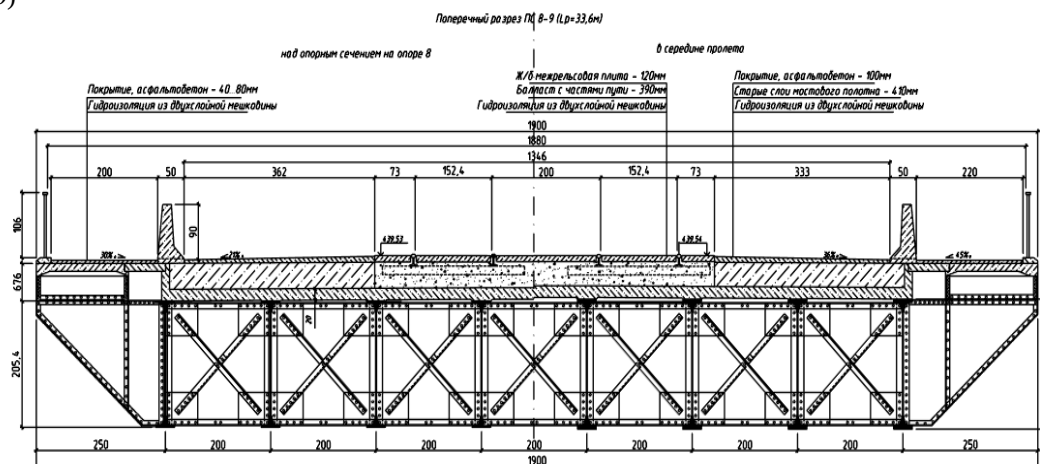


Рис. 8. Существующий путепровод:
а – общий вид; б – поперечное сечение пролетного строения

а)



б)



Рис. 9. Повреждения пролетного строения:
а – выщелачивание цементного камня на нижней поверхности плиты путепровода; б – коррозия верхних поясных уголков путепровода

усовершенствовать данную систему. Дополнительный слой гидроизоляции в данной схеме отсутствует, поверх поликомпозитной плиты проезжей части для автодорожной части напрямую укладывается слой асфальтобетона, а для трамвайной – блоки LVT, помещаемые в углубление непосредственно на плите.

Для проверки возможности совместной работы стального пролетного строения и поликомпозитной плиты проезжей части, для оценки прочности конструкции была разработана конечно-элементная модель наибольшего пролета рассматриваемого путепровода (пролет длиной 33,6 м). Моделирование и

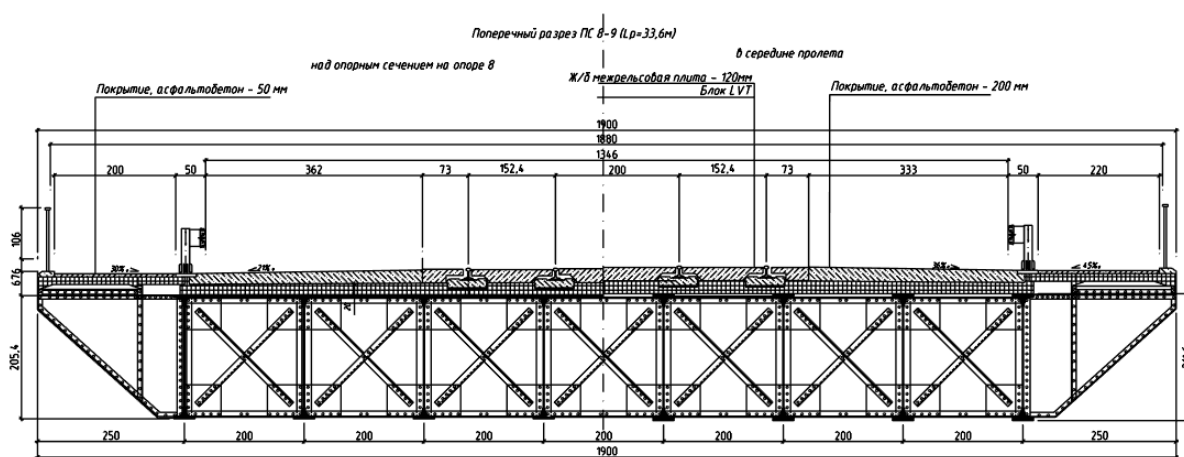
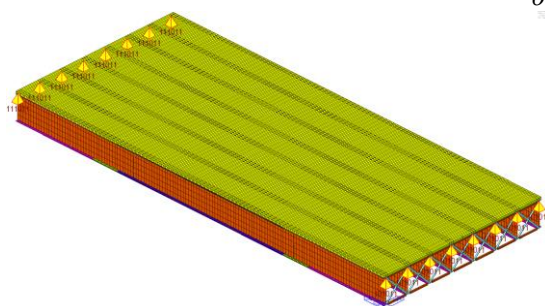


Рис. 10. Предлагаемое решение для капитального ремонта путепровода

а)



б)

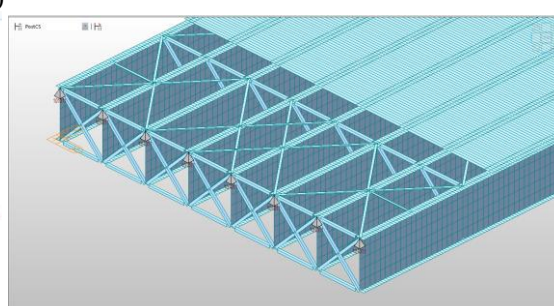


Рис. 11. Виды конечно-элементной модели:

а – общий вид; б – фрагмент

расчет производились в программном комплексе MIDAS Civil 2022. На рис. 11 приведен вид конечно-элементной модели.

Главные балки пролетного строения и плита проезжей части заданы плитными элементами, продольные и поперечные связи – балочными. Стальные элементы данной конструкции выполнены из стали марки СтЗкп. Композитная плита проезжей части смоделирована плитными элементами с характеристиками материала, соответствующими стеклопластику – GFRP (табл. 1). Соединение плиты проезжей части и стальных балок пролетного строения смоделировано жесткими связями. Всего расчетная модель содержит 21,3 тыс. элементов и четыре стадии монтажа. В модели заданы постоянные нагрузки от дорожной одежды и собственного веса, а также временные нагрузки по схемам А-14 и Н-14, нагрузка

от трамвая и пешеходов. Нагрузки и соответствующие им коэффициенты определялись согласно [4] и приведены в табл. 2. В модели учтена стадийность приложения нагрузок при ремонте пролетного строения.

Учет стадийности заключался в последовательном приложении постоянных нагрузок на изменяющиеся сечения несущих конструкций. В данном случае учтены следующие стадии:

- 1) демонтаж существующей плиты;
- 2) приложение нагрузок веса ПМК-плиты проезжей части к стальным балкам;
- 3) объединение сечения с плитой и приложение нагрузок мостового полотна, временных нагрузок.

Результаты стадийного расчета показали, что напряжения в главных балках при устройстве плиты и дорожной одежды не превышают расчетного сопротивления стали СтЗкп (рис. 12).

Таблица 1

Физико-механические характеристики стеклопластика [1, 14]

Направление волокон	Плотность, т/м ³	Модуль упругости, ГПа	Прочность при растяжении, МПа	Прочность при сжатии, МПа
Вдоль армирующих волокон	1,9–2,1	56–70	1 600–2 100	124,1
Поперек армирующих волокон	1,9–2,1	8,5–2,0	50–100	49,8

Таблица 2

Коэффициенты надежности и динамики по [4]

Тип нагрузки	Коэффициент надежности	Коэффициент динамики
<i>Постоянные нагрузки</i>		
Собственный вес конструкций балок, связей, ПМК-плиты, конструкций рельсового пути	1,1	—
Вес покрытия ездового полотна и тротуаров	1,5	—
<i>Временные нагрузки</i>		
A-14: тележка АК	1,5	1,4
равномерно распределенная нагрузка АК	1,25	1,0
H-14: тележка НК	1,1	1,0
Нагрузка от трамвая	1,26	1,28
Пешеходная нагрузка	1,4	1,0

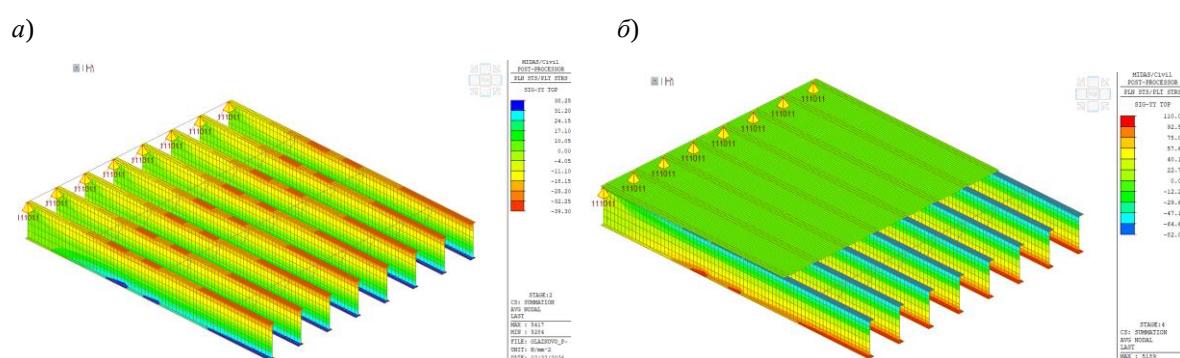


Рис. 12. Нормальные напряжения в стальных балках (показана половина пролетного строения и часть плиты), МПа:

а – при устройстве плиты; б – при полных постоянных нагрузках

Расчет прочности при наличии временных нагрузок проводился на наиболее невыгодное из сочетаний. На рис. 13 представлены значения нормальных напряжений в главных балках и поликомпозиционной плите проезжей части. Напряжения в стальных балках достигли 199,7 МПа, что не превышает расчетного сопротивления СтЗкп в 215 МПа по нижним поясам балок. Эксплуатируемый путепровод находится в историческом центре города с преимущественным автобусным и легковым движением. По результатам мониторинга реакций сооружения на обращающиеся нагрузки в 2019 г. установлено, что класс обращающихся нагрузок составляет 3,8 для одиночного проезда по схеме НК и 2,8 при полной загрузке путепровода по схеме АК, что значительно ниже проектного. Полученный коэффициент использования 0,93 на сочетание полных расчетных нагрузок по современным нормам, с учетом коэффициента надежности по материалу для стали СтЗкп, говорит о значительных запасах ресурса сооружения после его

ремонта с применением композитных плит проезжей части.

По поликомпозиционной плите проезжей части нормальные продольные к оси пролетного строения напряжения составляют не более 21 МПа, что меньше предела прочности материала при сжатии 49,8 МПа. В целом подтверждается возможность применения стеклопластика для капитального ремонта данного путепровода и исключаются риски потери устойчивости волокон внутри материала.

Расчет локальной работы плиты проводился при сочетании постоянных и временных нагрузок по схеме АК. Нормальные напряжения поперек оси пролетного строения от расчетного сочетания нагрузок в плите проезжей части представлены на рис. 14, а и составляют максимум 4,7 МПа, что не превышает максимально допустимых значений прочности материала при сжатии. На рис. 14, б показаны смещения узлов плиты у главных балок, где разность смещений составляет 4,3 мм.

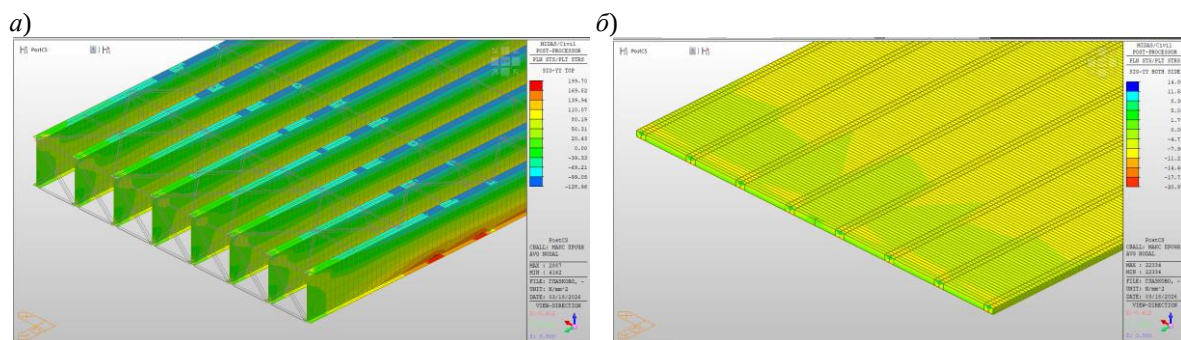


Рис. 13. Нормальные напряжения при сочетании расчетных постоянных и временных нагрузок (показана половина пролетного строения), МПа:
а – в стальных балках; б – в ПМК-плите проезжей части

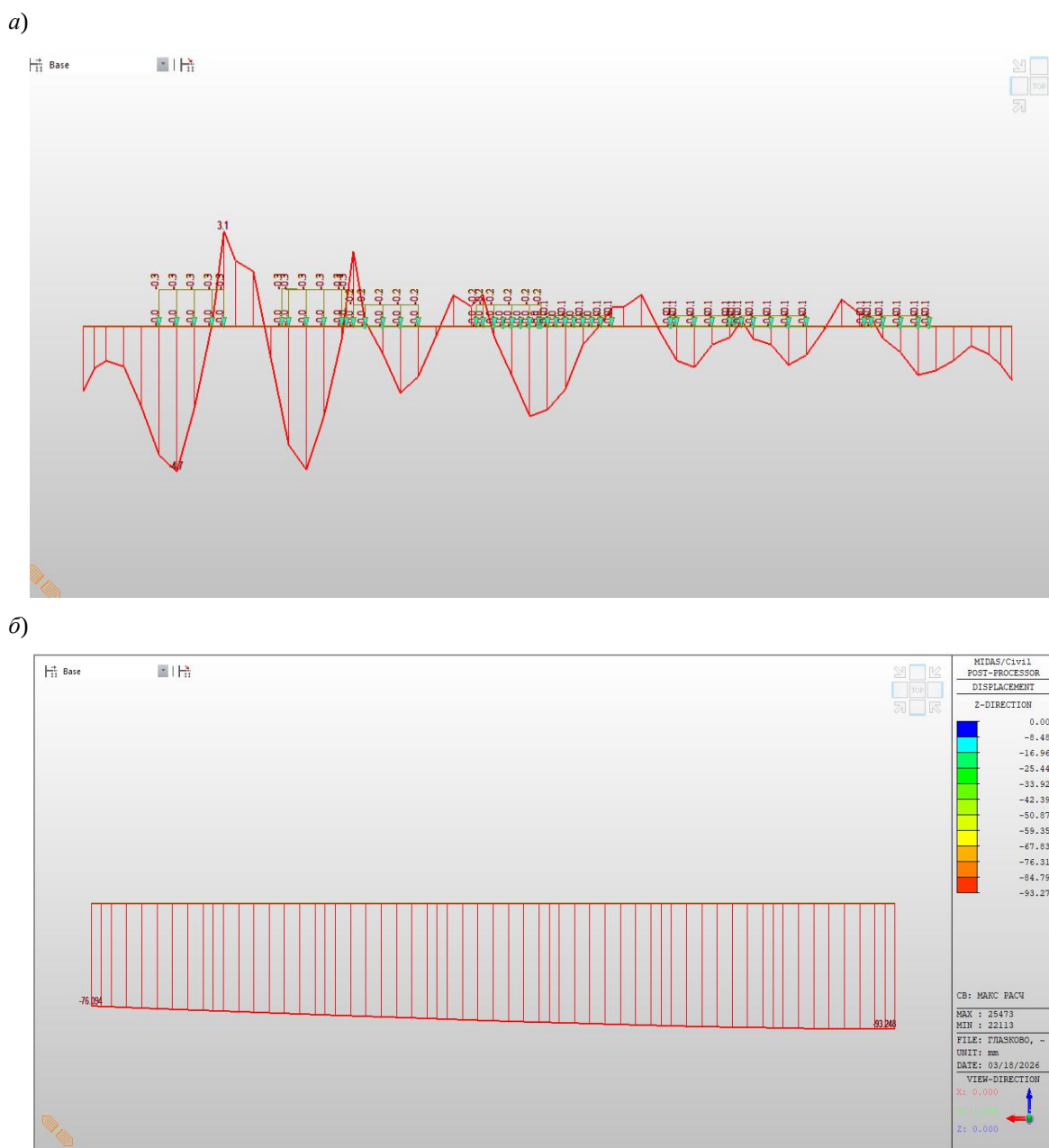


Рис. 14. Работа плиты проезжей части:
а – эпюры нормальных напряжений поперек оси пролетного строения, МПа; б – деформации плиты между главными балками поперек оси пролетного строения, мм

Для иллюстрации потенциальных экономических преимуществ использования ПКМ целесообразным является сравнение эксплуатационных расходов на содержание гидроизоляции моста из традиционных материалов и конструкции из полимерных композитных материалов.

Эксплуатационные затраты для сталежелезобетонного пролетного строения определены из учета необходимости замены гидроизоляционного слоя каждые 20 лет согласно [4]. В табл. 3 представлены основные статьи расходов на один цикл капитального ремонта гидроизоляции, вычисленные на основе государственных элементно-сметных норм (ГЭСН) и соответствующих им расценок. В табл. 4 приведены расчеты сметы основных работ на устройство плиты проезжей части из ПКМ. Срок окупаемости 1 м² композитной плиты проезжей части стоимостью 25,6 тыс. р. (по данным производителей) составляет примерно 35 лет, что приблизительно в 1,5 раза превышает межремонтный нормативный срок

капитального ремонта гидроизоляции. Это означает, что инвестиции в материал для композитной плиты проезжей части окупятся уже ко второму капитальному ремонту и будет получен экономический эффект в связи с отсутствием необходимости в повторных ремонтах гидроизоляционного слоя.

Выводы

Полимерные композитные материалы обладают значительным потенциалом для применения в несущих конструкциях пролетных строений городских мостов благодаря комплексу преимуществ, однако ключевым ограничением самостоятельного использования ПКМ является их хрупкое разрушение, отсутствие выраженной зоны текучести и низкие прочностные характеристики в поперечном направлении по сравнению с металлами. Наиболее перспективной является интеграция композитных материалов в состав комбинированных конструкций, где они работают совместно с традиционными материалами, в частности со сталью.

Таблица 3

Оценка затрат на капитальный ремонт гидроизоляции моста по [15]

Вид работы	Норма	Стоимость в пересчете на 1 м ² , р.	Стоимость на I квартал 2026 г., р.
Разборка бетонного защитного слоя гидроизоляции и бетонного выравнивающего слоя	ГЭСН 30-08-028-01	8 978,73	13 647,67
Устройство гидроизоляции	ГЭСН 30-08-132-01	4 799,28	7 294,90
Устройство защитного слоя бетона	ГЭСН 30-08-025-09	563,61	856,68
Устройство выравнивающего слоя из асфальтобетона	ГЭСН 30-08-025-06	670,29	1 018,85
Материалы гидроизоляции «Техноэластность»	—	856	856
<i>Итого</i>			23 674,1

Таблица 4

Оценка затрат на устройство поликомпозитной плиты проезжей части по [15]

Вид работы	Норма	Стоимость в пересчете на 1 м ² , р.	Стоимость на I квартал 2026 г., р.
Разборка бетонного защитного слоя гидроизоляции и бетонного выравнивающего слоя	ГЭСН 30-08-028-01	8 978,73	13 647,67
Разборка железобетонной плиты проезжей части	ГЭСН 27-12-010-04	217,24	330,20
Установка плиты проезжей части пролетного строения из ПКМ	ГЭСН 30-02-024-01	102,66	156,04
Устройство основного и рабочего слоя из асфальтобетона	ГЭСН 30-08-025-06	670,29	1 018,85
Плита проезжей части из ПКМ	—	—	25 641,02
<i>Итого</i>			40 793,78

Использование полимерных композитных плит для реконструкции проезжей части мостов, подобных путепроводу со сталежелезобетонными пролетными строениями, представляет собой технически реализуемое и экономически эффективное направление развития мостостроения. Оно напрямую способствует решению задач по повышению транспортной безопасности, долговечности инфраструктуры и оптимизации расходов на ее содержание в долгосрочной перспективе.

Дальнейшие исследования применения композитных материалов при капитальных ремонтах городских и автодорожных мостов могут быть направлены на уточнение расчетных моделей в местах объединения балок с плитой, учет местных временных нагрузок на плиту проезжей части, совершенствование методов расчета сталекомпозитных пролетных строений.

Список источников

1. Применение полимерных композитных материалов в пролетных строениях автодорожных мостов / А. А. Пискунов, С. А. Луканкин, Е. В. Мазур [и др.] // Транспортные сооружения. 2024. Т. 11, № 3. URL: <https://t-s.today/PDF/09SATS324.pdf> (дата обращения: 10.02.2026).
2. Bonn M. Span-tastic news as plastic bridge is open in Aberfeldy // Daily Record. URL: <https://www.dailyrecord.co.uk/news/local-news/span-tastic-news-plastic-bridge-13225299> (дата обращения: 10.02.2026).
3. Sobrino J. A., Dolores M., Pulido G. Towards advanced composite material footbridges // 9th International Conference on Short and Medium Span Bridges. Calgary, Alberta, Canada, July 15–18, 2014. URL: <https://steel-sci.com/assets/minorca-bridge.pdf> (дата обращения: 10.02.2026).
4. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84. Москва : ЦНИИС, 2011. 40 с.
5. «АПАТЭК» получил премию JEC Awards за выпуск крупногабаритных конструкций // PLASTINFO : [сайт]. URL: https://plastinfo.ru/information/news/47565_03.06.2021 (дата обращения: 21.02.2026).
6. Sonnenschein R., Gajdosova K., Holly I. FRP Composites and their using in the construction of bridges // World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium 2016, WMCAUS 2016. URL: https://www.researchgate.net/publication/309268786_FRP_Composites_and_their_Using_in_the_Construction_of_Bridges (дата обращения: 10.02.2026).
7. Tuakta C. Use of Fiber reinforced polymer composite in bridge structures: thesis (M. Eng.) / C. Tuakta ; Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Civil and Environmental Engineering. 2005. URL: <http://hdl.handle.net/1721.1/31126> (дата обращения: 10.02.2026).
8. Экспериментально-теоретическое исследование механического поведения 3D-композитов при квазистационарном разрушении / М. В. Цепенников, А. А. Стром, И. А. Повышев, О. Ю. Сметанников // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2016. № 2. С. 143–158.
9. Васильев В. В. Механика конструкций из композитных материалов. Москва : Машиностроение, 1988. 272 с.
10. Полилов А. Н., Татусь Н. А. Биомеханика прочности волокнистых композитов. Москва : Физматлит, 2018. 328 с.
11. Иванов А. Н., Кожевников В. С. Замена железобетонной плиты на стеклопластиковую в пролетных строениях // Путь и путевое хозяйство. 2022. № 7. С. 29–32.
12. Бокарев С. А., Неровных А. А., Ефимов С. В. Классификация полимерных композиционных материалов, применяемых для усиления искусственных сооружений // Политранспортные системы : материалы VIII Международной научно-технической конференции в рамках года науки Россия – ЕС «Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке», Новосибирск, 20–21 ноября 2014 г. Новосибирск : Сибирский государственный университет путей сообщения, 2015. С. 104–108.
13. Смердов Д. Н., Неровных А. А., Костенко А. Н. Применение полимерных композиционных материалов в мостах // Цементные бетоны : сборник статей 78-й Международной ежегодной научно-методической и научно-исследовательской конференции секции ОНИЛ «Цемент», Москва, 31 января 2020 г. Москва : Техполиграфцентр, 2020. С. 32–37.
14. Анализ устройств и способов объединения в совместную работу полимерно-композитных главных балок пролетного строения и плиты ездового полотна автодорожных мостов / С. В. Рыбаков, А. А. Пискунов, М. Н. Ерофеев [и др.] // Транспортные сооружения. 2024. Т. 11, № 4. URL: <https://t-s.today/PDF/01SATS424.pdf> (дата обращения: 10.02.2026).
15. ГЭСН 81-02-30–2022. Сборник 30. Мосты и трубы. Москва, 2022. 111 с.

References

1. Piskunov A. A., Lukankin S. A., Mazur E. V. [et al.]. Application of Polymer Composite Materials in Superstructures of Road Bridges. *Transport Facilities*. 2024;11(3). (In Russ.). URL: <https://t-s.today/PDF/09SATS324.pdf>.
2. Bonn M. Span-tastic news as plastic bridge is open in Aberfeldy. Daily Record. URL: <https://www.dailyrecord.co.uk/news/local-news/span-tastic-news-plastic-bridge-13225299>.
3. Sobrino Juan A., Dolores M., Pulido G. Towards Advanced Composite Material Footbridges. *9th International Conference on Short and Medium Span Bridges*. Calgary, Alberta, Canada, July 15–18, 2014. URL: <https://steel-sci.com/assets/minorca-bridge.pdf>.
4. 'ApATeK' received the JEC Award for the production of large-sized structures. (In Russ.). URL: https://plastinfo.ru/information/news/47565_03.06.2021.
5. SP 35.13330.2011. Bridges and Pipes. Updated Edition of SNiP 2.05.03-84. Moscow: TsNIIS; 2011. 40 p. (In Russ.).
6. Sonnenschein R., Gajdosova K., Holly I. FRP Composites and Their Using in the Construction of Bridges. World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium 2016, WMCAUS 2016. URL: https://www.researchgate.net/publication/309268786_FRP_Composites_and_their_Using_in_the_Construction_of_Bridges.
7. Tuakta C. Use of Fiber Reinforced Polymer Composite in Bridge Structures: Thesis (M. Eng.). Chakprapan Tuakta, Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Civil and Environmental Engineering, 2005. URL: <http://hdl.handle.net/1721.1/31126>.
8. Tsepennikov M. V., Strom A. A., Povyshev I. A., Smetannikov O. Yu. Theoretical-experimental study of the mechanical behavior of 3D composites under quasi-steady damage. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanics*. 2016;(2):143–158. (In Russ.).
9. Vasiliev V. V. Mechanics of structures made of composite materials. Moscow: Mashinostroenie; 1988. 272 p. (In Russ.).
10. Polilov A. N., Tatus N. A. Biomechanics of the strength of fiber composites. Moscow: FIZMATLIT; 2018. 328 p. (In Russ.).
11. Ivanov A. N., Kozhevnikov V. S. Replacing of reinforced concrete slab with a fiberglass slab in superstructures of bridges. *Track and Track Facilities*. 2022;(7):29–32. (In Russ.).
12. Bokarev S. A., Nerovnykh A. A., Efimov S. V. Classification of polymer composite materials used for strengthening artificial structures. *Politransport Systems. Proceedings of the VIII international scientific and technical conference within the framework of the year of science Russia-EU 'Scientific problems of implementing transport projects in Siberia and the Far East', Novosibirsk, November 20–21, 2014*. Novosibirsk: Siberian Transport University; 2015. P. 104–108. (In Russ.).
13. Smerdov D. N., Nerovnykh A. A., Kostenko A. N. Application of polymer composite materials in bridges. *Cement Concretes. Proceedings of the 78th International Annual Scientific-Methodological and Scientific-Research Conference of the ONIL 'CEMENT' Section, Moscow, January 31, 2020*. Moscow: Tekhpolygraftsent; 2020. P. 32–37. (In Russ.).
14. Rybakov S. V., Piskunov A. A., Erofeev M. N. [et al.]. Analysis of structure and methods for integrating polymer-composite main beam of span structures and the deck slab of road bridges. *Transport Facilities*. 2024;11(4). (In Russ.). URL: <https://t-s.today/PDF/01SATS424.pdf>.
15. GESN 81-02-30-2022. Proceedings 30. Bridges and Pipes. Moscow; 2022. 111 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Т. М. Баранов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство железных дорог, мостов и транспортных тоннелей» Иркутского государственного университета путей сообщения.

Д. В. Хамидулина – студент факультета «Строительство железных дорог» Иркутского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

T. M. Baranov – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Railway Construction Department, Irkutsk State Transport University.

D. V. Khamidulina – Student of the Railway Construction Faculty, Irkutsk State Transport University.

Статья поступила в редакцию 19.03.2026; одобрена после рецензирования 08.05.2026; принята к публикации 21.05.2026.

The article was submitted 19.03.2026; approved after reviewing 08.05.2026; accepted for publication 21.05.2026.

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 22.06.2026. Дата выхода в свет 24.06.2026
Тираж 350 экз. Формат 60×84/8
Объем 15,0 уч.-изд. л., 16,0 усл.-печ. л. Заказ № 4090

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. № 2 (79). 1–128