

ISSN 1815-9265

ВЕСТНИК

Сибирского государственного
университета путей сообщения

№ 3 (80). 2026 16+



УЧРЕДИТЕЛЬ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»

Состав редколлегии

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Заместитель главного редактора

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

Ответственный секретарь

Галай Марина Сергеевна – канд. техн. наук

Члены редколлегии:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редактор перевода текста на английский язык

Степачкова Ирина Игоревна – старший преподаватель

Редактор *Е. Е. Рыжкова*

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

Макет, верстка *Ю. В. Борцовой*

Дизайн обложки *А. С. Петренко*

Сайт журнала:

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

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

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

FOUNDER

The Siberian Transport University

Editors and Editorial Board

Editor-in-Chief

A. L. Manakov, Doctor of Engineering, Professor

Deputy Editor

A. D. Abramov, Doctor of Engineering, Professor

Deputy Editor

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

Executive Secretary

M. S. Galay, Candidate of Engineering

Editors

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

English Text Reviewer

I. I. Stepachkova, Senior Lecturer

Text Reviewer **E. E. Ryzhkova**

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

Layout Designer **Yu. V. Bortsova**

Cover Designer **A. S. Petrenko**

Main contact details

Siberian Transport University

room 307, 191, Dusi Kovalchuk St.

630049, Novosibirsk, Russia

Phone: (383) 328-04-36

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

E-mail: vestniksgups@sibgups.ru

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

ISSN: 1815-9265

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

№ 3 (80) · 2026 · ИЮЛЬ – СЕНТЯБРЬ · 16+

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

СОДЕРЖАНИЕ

Транспорт

<i>Бергер Н. В.</i> Методический подход к формированию системы планирования развития транспортно-логистической инфраструктуры региона на основе транспортных балансов и временных критериев	5
<i>Грефенштейн А. П.</i> Моделирование влияния городского распределительного центра на общий пробег грузовых автомобилей	13
<i>Упырь Р. Ю.</i> Методика маршрутизации материальных потоков в логистике при ограничениях загрузки узлов и дифференцированной ценности грузов	23
<i>Ковалева Н. А., Муленко О. В., Хашев А. И.</i> Формирование технических маршрутов в динамической среде управления перевозочным процессом	30
<i>Школина Д. И., Бехер С. А., Попков А. А., Выплавень В. С.</i> Анализ работы автоматизированной системы измерения геометрических параметров пружин рессорного подвешивания	39
<i>Ададунов А. С.</i> Интеграция физической нагрузочной и статистической деградационной моделей при прогнозировании ресурса верхнего строения железнодорожного пути для новых условий эксплуатации	47
<i>Мамеева Е. А., Величко Д. В., Щербаков В. В.</i> Анализ динамики роста эксплуатационных отказов металлокомпозитных стыков в условиях Транссибирской и Среднесибирской магистралей	55
<i>Войченко А. А., Ильиных А. С.</i> Оценка напряженно-деформированного состояния упругой клеммы скрепления в зависимости от усилия затяжки крепежителя	66
<i>Шаповалов В. Л., Мироненко Е. В., Корниенко Е. В.</i> Подходы к определению необходимой температуры закрепления рельсовых плетей бесстыкового пути	75
<i>Абрамов А. Д., Манаков А. Л., Кочергин В. И., Семенов М. А.</i> Сущность оценки качества работ путевых и снегоуборочных машин	85

Строительство и архитектура

<i>Козловский В. Е., Смирнов И. М.</i> Об эффекте снижения осадки при дискретизации фундамента	93
<i>Тихомиров В. М., Герасимов С. И., Попов А. М.</i> Исследование усилий взаимодействия рельсов и шпал при неравномерной осадке железнодорожного пути	102
<i>Осетинский О. В., Лазарев Ю. Г., Белый А. А.</i> Методика предиктивного прогнозирования при проведении мониторинга технического состояния искусственных сооружений	109

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"

№ 3 (80) · 2026 · July – September · 16+

Issued quarterly. Established in 1999

CONTENTS

Transport

- N. V. Berger.* A methodological approach to the formation of a planning system for the development of regional transport and logistics infrastructure based on transport balances and time criteria ...5
- A. P. Grefenshteyn.* Modeling the impact of an urban consolidation center on the total truck mileage13
- R. Yu. Upyr.* A methodology for routing material flows in logistics under node load constraints and differentiated cargo value23
- N. A. Kovaleva, O. V. Mulyenko, A. I. Khashev.* Formation of technical routes in a dynamic transportation management environment30
- D. I. Shkolina, S. A. Bekher, A. A. Popkov, V. S. Vyplaven.* Analysis of the operation of an automated system for measuring geometric parameters of suspension spring coils.....39
- A. S. Adadurov.* Integration of physical load and statistical degradation models in predicting the resource of the upper structure of the railway track for new operating conditions47
- E. A. Mameeva, D. V. Velichko, V. V. Shcherbakov.* Analysis of the growth dynamics of perational failures of metal composite joints in the conditions of the Trans-Siberian and Central Siberian Railways.....55
- A. A. Voychenko, A. S. Ilinykh.* Assessment of the stress-strain state of an elastic rail fastening clip as a function of the fastener tightening force66
- V. L. Shapovalov, E. V. Mironenko, E. V. Kornienko.* Approaches to determining the required fastening temperature of continuously welded rail (CWR) track.....75
- A. D. Abramov, A. L. Manakov, V. I. Kochergin, M. A. Semenov.* The essence of performance assessment of track maintenance and snow removal machines85

Building and Architecture

- V. E. Kozlovsky, I. M. Smirnov.* On the effect of reducing preparation during foundation discretisation93
- V. M. Tikhomirov, S. I. Gerasimov, A. M. Popov.* Study of the interaction forces between rails and sleepers in case of uneven track settlement102
- O. V. Osetinsky, Yu. G. Lazarev, A. A. Bely.* Predictive forecasting methodology for monitoring the technical condition of artificial structures.....109

ТРАНСПОРТ

Научная статья
УДК 656.02
doi:10.52170/1815-9265_2026_80_5

Методический подход к формированию системы планирования развития транспортно-логистической инфраструктуры региона на основе транспортных балансов и временных критериев

Никита Вячеславович Бергер

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

Аннотация. Развитие транспортно-логистической инфраструктуры региона требует применения системных методов планирования, обеспечивающих согласование потребностей экономики, возможностей транспортной сети и временных параметров доставки грузов. В условиях ограниченности инфраструктурных ресурсов и роста объемов перевозок традиционные подходы, основанные на статических показателях, оказываются недостаточно эффективными. Целью настоящего исследования является разработка методического подхода к формированию системы планирования развития транспортно-логистической инфраструктуры региона на основе транспортных балансов и временных критериев достижения целевых показателей.

В работе используются методы балансового анализа, системного моделирования, индикативного планирования и оценки временной доступности. Предлагаемый подход базируется на формировании межотраслевых транспортных балансов, отражающих распределение грузопотоков между секторами экономики и элементами транспортной сети, а также на использовании временных критериев как ключевых индикаторов эффективности инфраструктурного развития. Методика позволяет выявлять дисбаланс между спросом на перевозки и провозной способностью инфраструктуры, определять приоритетные направления развития и оценивать эффект инфраструктурных мероприятий во времени.

Научная новизна исследования заключается в интеграции транспортных балансов и временных критериев в единую систему планирования развития транспортно-логистической инфраструктуры региона. Практическая значимость работы состоит в возможности применения предложенного подхода органами регионального управления для обоснования стратегических и программных решений в сфере развития транспортной отрасли.

Ключевые слова: транспортно-логистическая инфраструктура, система планирования, транспортные балансы, временные критерии, региональное развитие, инфраструктурное планирование

Для цитирования: Бергер Н. В. Методический подход к формированию системы планирования развития транспортно-логистической инфраструктуры региона на основе транспортных балансов и временных критериев // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 3 (80). С. 5–12. DOI 10.52170/1815-9265_2026_80_5.

TRANSPORT

Original article

A methodological approach to the formation of a planning system for the development of regional transport and logistics infrastructure based on transport balances and time criteria

Nikita V. Berger

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia, nikita.berger@mail.ru

Abstract. The development of regional transport and logistics infrastructure requires systematic planning methods that ensure coordination between economic demand, transport network capacity, and delivery time parameters. Under conditions of limited infrastructure resources and growing freight volumes, traditional approaches based on static indicators become insufficient. The purpose of this study is to develop a methodological approach to forming a system for planning the development of regional transport and logistics infrastructure based on transport balances and time-based performance criteria.

The research applies methods of balance analysis, system modeling, indicative planning, and time accessibility assessment. The proposed approach is based on the formation of intersectoral transport balances reflecting the distribution of freight flows among economic sectors and transport infrastructure elements, as well as the use of time criteria as key indicators of infrastructure development effectiveness. The methodology allows identifying

imbalances between transport demand and infrastructure capacity, determining development priorities, and evaluating the temporal effects of infrastructure measures.

The scientific novelty lies in integrating transport balances and time criteria into a unified planning system for regional transport and logistics infrastructure development. The practical significance of the study is associated with the applicability of the proposed approach for regional authorities in substantiating strategic and program decisions in transport sector development.

Keywords: transport and logistics infrastructure, planning system, transport balances, time criteria, regional development, infrastructure planning

For citation: Berger N. V. A methodological approach to the formation of a planning system for the development of regional transport and logistics infrastructure based on transport balances and time criteria. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(80):5–12. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_80_5.

Введение

Транспортно-логистическая инфраструктура является базовым элементом пространственного развития региона, обеспечивающим связность территорий, функционирование производственных цепочек и доступность рынков [1]. В условиях роста объемов перевозок и усложнения логистических схем возрастает необходимость перехода от фрагментарных инфраструктурных решений к системному планированию развития транспортной сети [2].

Существующая практика регионального транспортного планирования, как правило, опирается на агрегированные показатели грузооборота и инвестиционных затрат, не учитывая отраслевую структуру экономики и временные параметры доставки грузов [3]. Это приводит к возникновению дисбаланса между потребностями экономики и возможностями транспортной инфраструктуры.

Использование транспортных балансов позволяет обеспечить согласование объемов грузообразования и грузопотребления с пропускной способностью транспортной сети [4]. В то же время включение временных критериев в систему планирования дает возможность оценивать эффективность инфраструктурных решений с точки зрения достижения целевых параметров развития в заданные сроки [5].

В этой связи актуальной является разработка методического подхода к формированию системы планирования развития транспортно-логистической инфраструктуры региона, основанной на балансовых и временных принципах.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования является транспортно-логистическая инфраструктура региона, включающая транспортные коридоры, логистические узлы и терминалы. Предмет исследования – система планирования развития данной инфраструктуры в условиях ограниченности ресурсов и роста спроса на перевозки.

Методологическую основу исследования составляют методы транспортного балансового анализа, системного подхода, индикативного и программно-целевого планирования, а также методы оценки временной доступности [6].

Транспортный баланс региона представляет собой систему количественных соотношений между объемами производства и потребления продукции в отраслях экономики и возможностями их транспортного обеспечения. В общем виде транспортный баланс может быть представлен следующим образом:

$$\sum_{i=1}^n Q_i^{prod} = \sum_{j=1}^m Q_j^{cons} + Q_{tr}, \quad (1)$$

где Q_i^{prod} – объем грузообразования по отраслям экономики; Q_j^{cons} – объем грузопотребления; Q_{tr} – транзитные перевозки.

Формирование транспортных балансов по видам грузов и направлениям перевозок позволяет выявлять диспропорции между спросом на транспортные услуги и возможностями инфраструктуры.

В работе предлагается использовать временные критерии как ключевые показатели эффективности развития транспортно-логистической инфраструктуры региона [7]. Основным временным критерием является суммарное время доставки груза

$$T = T_{tr} + T_{log}, \quad (2)$$

где T_{tr} – время транспортировки; T_{log} – время логистической обработки.

Для целей планирования вводится нормативное значение времени доставки T_{norm} , соответствующее целевым ориентирам социально-экономического развития региона [8]. Инфраструктурные мероприятия оцениваются с точки зрения способности сократить отклонение по формуле

$$\Delta T = T_{fact} - T_{norm}, \quad (3)$$

где ΔT – отклонение фактического времени доставки груза от нормативного (целевого) значения, ч; T_{fact} – фактическое суммарное время доставки груза по рассматриваемому направле-

нию, включающее время перевозки и логистической обработки, ч; T_{norm} – нормативное (целевое) время доставки, установленное на основе стратегических ориентиров развития региона и требований к транспортному обслуживанию, ч.

При $\Delta T > 0$ фактическое время доставки превышает нормативное, что свидетельствует о наличии временной диспропорции; при $\Delta T = 0$ достигается целевой параметр; при $\Delta T < 0$ формируется временной резерв.

Чем меньше значение ΔT , тем выше эффективность рассматриваемого инфраструктурного мероприятия; приоритет получают проекты, обеспечивающие максимальное сокращение ΔT при сопоставимых ресурсных затратах.

Методический подход включает следующие этапы:

1. Формирование транспортных балансов региона по отраслям экономики.
2. Оценка текущих временных параметров доставки грузов.
3. Выявление балансовых и временных диспропорций.
4. Формирование перечня инфраструктурных мероприятий.
5. Оценка их влияния на транспортные балансы и временные показатели [9].

6. Ранжирование мероприятий по критерию сокращения времени достижения целей.

Для конкретизации содержания предложенного методического подхода и проверки его прикладной применимости выполнена его апробация на материалах Новосибирской области – региона с выраженными функциями транспортно-логистического хаба. Выбор данного объекта обусловлен высокой ролью области в межрегиональных и транзитных перевозках, а также развитием Западной, Восточной и Южной транспортно-логистических зон Новосибирского транспортного узла [10]. Содержание исследования по этапам представлено в табл. 1.

Этапы методического подхода представляют собой последовательную исследовательскую процедуру, в которой транспортные балансы и временные критерии используются совместно: сначала для диагностики диспропорций, затем для отбора и ранжирования инфраструктурных мероприятий [11].

Результаты исследования

Эмпирическая база исследования сформирована по материалам 2024 г., при этом отдельные выводы о приоритетах инфраструктурного развития интерпретируются с учетом

Таблица 1

Содержание исследования

Этап	Содержание	Информационная база	Результат
1. Формирование транспортных балансов	Выделение укрупненных грузовых групп, оценка грузообразования, грузопотребления и транзитной нагрузки по основным направлениям	Данные о структуре экономики региона, материалы по транспортному узлу, статистика перевозок	Транспортный баланс по грузовым группам и направлениям
2. Оценка временных параметров	Расчет фактического времени доставки как суммы времени транспортировки и логистической обработки; выделение направлений с максимальным отклонением от норматива	Данные о конфигурации транспортного узла, расчетные временные параметры по направлениям	Матрица фактических и нормативных временных параметров
3. Выявление диспропорций	Сопоставление балансового дефицита и временного отклонения по каждому направлению	Результаты этапов 1 и 2	Карта приоритетных узких мест инфраструктуры
4. Формирование мероприятий	Отбор мероприятий по развитию узлов, терминалов, подъездов, перерабатывающих мощностей и межвидового взаимодействия	Стратегические документы региона, проект ТЛЦ «Сибирский», материалы по транспортным зонам	Перечень альтернативных инфраструктурных решений
5. Оценка влияния мероприятий	Сценарный расчет влияния мероприятий на дефицит транспортных мощностей и на сокращение ΔT	Балансовая и временная модели	Количественная оценка эффекта по каждому сценарию
6. Ранжирование мероприятий	Сопоставление сценариев по сокращению дефицита и времени доставки, выделение первоочередных решений	Результаты этапа 5	Иерархия приоритетов инфраструктурного развития

прогнозных ориентиров функционирования транспортно-логистической системы региона до 2028 г.

Апробация предложенного методического подхода выполнена на материалах Новосибирской области. Выбор региона обусловлен его высокой транспортно-логистической значимостью: область позиционируется как один из крупнейших транспортных узлов страны и ключевой элемент цепи доставки грузов с Дальнего Востока в европейскую часть России и в обратном направлении, а также из Китая. В стратегии социально-экономического развития региона закреплена задача формирования сбалансированной интермодальной транспортной системы, а Новосибирский транспортный узел включает Западную, Восточную и Южную транспортно-логистические зоны. Существенное значение транспортного комплекса для экономики области подтверждается тем, что доля вида деятельности «Транспортировка и хранение» в структуре ВРП составляет 11,2 %; при этом торговля формирует 15,8 % ВРП, сельское хозяйство – 4,5 %, строительство – 5 %, что предопределяет высокий спрос на перевозки и переработку грузов. По данным официальной статистики, в 2024 г. объем перевозки грузов автомобильным транспортом в Новосибирской области составил 23 229 тыс. т.

Для целей исследования была сформирована укрупненная расчетная модель транспортного баланса Новосибирской области по пяти основным грузовым группам. При ее построении учитывались отраслевая структура эконо-

мики региона, выраженная оптово-распределительная функция, транзитная роль Новосибирского транспортного узла и наличие трех транспортно-логистических зон. Результаты балансовой оценки представлены в табл. 2.

Полученные результаты показывают, что наибольший балансовый дефицит формируется не по массовым строительным или аграрным грузам, а по контейнеризированным потребительским и транзитным потокам. Их совокупный дефицит составляет 2,9 млн т в год (65,9 % от общего расчетного дефицита транспортных мощностей). Это соответствует экономической специализации Новосибирской области как оптово-распределительного и транзитного центра и подтверждает, что ключевые ограничения сосредоточены в мультимодальных узлах и на направлениях переработки контейнерных потоков, а не только на линейных участках транспортной сети.

Для проверки временной составляющей методического подхода были рассчитаны фактические и нормативные параметры доставки по основным направлениям, связанным с Западной, Восточной и Южной транспортно-логистическими зонами, а также с внутригородским распределением грузов в агломерации (табл. 3).

Как показывают данные табл. 3, отклонение фактического времени доставки от нормативного составляет от 6 до 18 ч, а относительное превышение норматива достигает 22–33 %. При этом во всех направлениях существенная часть времени приходится не на магистральное

Таблица 2

**Укрупненный транспортный баланс Новосибирской области
по основным грузовым группам, млн т в год**

Грузовая группа	Расчетная транспортная потребность	Оценка доступной инфраструктурной емкости	Дефицит (+) / профицит (–)	Приоритетная зона концентрации
Агропромышленная и продовольственная продукция	5,4	5,0	+0,4	Южная ТЛЗ
Строительные грузы и инертные материалы	6,2	5,8	+0,4	Восточная и Южная ТЛЗ
Продукция обрабатывающих производств	7,1	6,4	+0,7	Восточная и Западная ТЛЗ
Контейнеризированные потребительские и оптово-распределительные грузы	8,6	7,2	+1,4	Западная и Восточная ТЛЗ
Транзитные контейнерные потоки	10,5	9,0	+1,5	Западная ТЛЗ, ТЛЦ «Сибирский»
<i>Итого</i>	37,8	33,4	+4,4	–

Таблица 3

Временные параметры доставки грузов по ключевым направлениям Новосибирской области

Направление	Время транспортировки, ч	Время логистической обработки, ч	Фактическое время доставки T_{fact} , ч	Нормативное время T_{norm} , ч	Отклонение ΔT , ч	Основной ограничивающий элемент
Западная ТЛЗ – западное межрегиональное направление	61	29	90	72	18	Перегрузка терминалов и маневровая переработка
Восточная ТЛЗ – Кузбасс / Красноярский вектор	38	23	61	48	13	Недостаточная синхронизация терминальной обработки
Южная ТЛЗ – южный экспортно-распределительный вектор	42	24	66	54	12	Концентрация потоков на подъездах и в узле
Внутриагломерационное распределение грузов	10	14	24	18	6	Очередность на терминалах и городские автоподходы

движение, а на логистическую обработку: ее доля составляет от 32,2 до 58,3 % фактического времени доставки. Следовательно, первоочередные резервы повышения эффективности транспортно-логистической инфраструктуры Новосибирской области связаны с модернизацией узлов, терминалов и подъездов, а не только с наращиванием протяженности или пропускной способности линейной сети. Это особенно важно в условиях роста контейнерной переработки Новосибирского транспортно-логистического узла, которая, по оценкам специалистов, к 2028 г. должна увеличиться на 147 % к текущему уровню.

Апробация на материалах Новосибирской области показала, что совмещение балансового и временного анализа позволяет не просто зафиксировать наличие инфраструктурного дефицита, но и определить его локализа-

цию, тип и степень влияния на достижение целевых параметров развития региона.

Для сопоставления предлагаемого методического подхода с инерционным планированием были рассмотрены два сценария (табл. 4). В первом случае приоритеты определялись по традиционной логике: преимущество получали направления с наиболее высокой текущей нагрузкой и проекты линейного расширения пропускной способности. Во втором случае использовался предлагаемый подход, основанный на одновременном учете балансового дефицита и отклонения фактического времени доставки от нормативного значения. Для Новосибирской области такая постановка особенно значима, поскольку регион сочетает функции крупного транзитного узла, оптово-распределительного центра и площадки развития мультимодального ТЛЦ «Сибирский», ориентированного на снижение

Таблица 4

Сравнение инерционного и предлагаемого подходов на материалах Новосибирской области

Показатель	Инерционное планирование	Предлагаемый подход
Снижение суммарного балансового дефицита, млн т в год	1,6	3,4
Сокращение совокупного отклонения ΔT по четырем направлениям, ч	12	33
Количество направлений, приблизившихся к нормативу T_{norm}	1 из 4	3 из 4
Основной объект инвестиций	Линейные участки с максимальной текущей загрузкой	Узлы, терминалы, мультимодальные стыки и подъезды
Учет транзитных и контейнерных потоков	Частичный	Полный
Учет вторичных ограничений в логистических зонах	Отсутствует	Присутствует

логистических издержек и повышение эффективности транспортной системы.

Результаты апробации показывают, что применение предложенного методического подхода позволяет выявлять не только общий дефицит транспортно-логистической инфраструктуры, но и его конкретную локализацию по грузовым группам, направлениям и элементам узловой переработки. В отличие от инерционного планирования, ориентированного преимущественно на расширение наиболее загруженных линейных участков, предлагаемый подход обеспечивает более точное определение приоритетов за счет совместного учета балансовых и временных диспропорций. Это позволяет отбирать мероприятия, которые не только увеличивают инфраструктурную емкость, но и обеспечивают наибольшее сокращение отклонения фактического времени доставки от нормативного значения, что делает систему планирования более ориентированной на результат.

Для проверки устойчивости результатов был проведен сценарный анализ чувствительности модели (табл. 5). Вариация расчетного объема спроса на перевозки в диапазоне $\pm 10\%$, а также изменение временных параметров логистической обработки в диапазоне $\pm 15\%$ не привели к изменению состава двух наиболее приоритетных мероприятий: модернизации узловой переработки в Западной транспортно-логистической зоне и развития мультимодальной обработки контейнерных потоков с опорой на ТЛЦ «Сибирский». Это свидетельствует о том, что выявленные приоритеты обладают методической устойчивостью и не зависят от колебаний отдельных исходных параметров в разумных пределах.

Вместе с тем результаты исследования имеют ряд ограничений. Во-первых, расчеты

выполнены на укрупненном уровне и не отражают внутрисуточную и сезонную неравномерность потоков. Во-вторых, в модели использованы усредненные значения временных параметров, что требует дальнейшей детализации на уровне отдельных терминалов и технологических операций. В-третьих, часть показателей носит расчетный характер и должна уточняться при переходе от методической апробации к прикладному проектированию конкретных инфраструктурных объектов. Однако даже в таком виде предложенный подход демонстрирует аналитическую состоятельность и может быть использован для обоснования приоритетов транспортно-логистического развития Новосибирской области.

Выводы

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Доказано, что использование транспортных балансов в качестве основы планирования позволяет выявлять структурные несоответствия между потребностями экономики региона и возможностями транспортно-логистической инфраструктуры, которые не обнаруживаются при использовании агрегированных показателей грузооборота.

2. Установлено, что временные критерии доставки грузов являются ключевыми индикаторами эффективности развития транспортно-логистической инфраструктуры, поскольку напрямую отражают достижимость целевых социально-экономических параметров региона.

3. Показано, что интеграция балансовых и временных критериев в единую систему планирования дает возможность более точного обоснования приоритетов инфраструктурного развития по сравнению с традиционными стоимостными и техническими подходами.

Таблица 5

Проверка устойчивости результатов исследования

Вариант проверки	Изменяемый параметр	Результат
Базовый сценарий	Исходные расчетные значения	Приоритет 1 – западная ТЛЗ; приоритет 2 – мультимодальная контейнерная переработка
Сценарий А	Рост спроса на перевозки на 10 %	Состав первых двух приоритетов не изменился
Сценарий В	Снижение спроса на перевозки на 10 %	
Сценарий С	Увеличение времени логистической обработки на 15 %	Усилилось значение узловых мероприятий, ранжирование лидеров сохранилось
Сценарий D	Сокращение времени логистической обработки на 15 %	Общий эффект вырос, но ранжирование лидеров сохранилось

4. Разработанный методический подход позволяет ранжировать инфраструктурные мероприятия по их вкладу в сокращение времени достижения целей регионального развития, что формирует основу для перехода к целевому и ориентированному на результат планированию.

5. Практическая значимость исследования заключается в возможности применения предложенной системы планирования органами ре-

гионального управления при разработке стратегий, программ и инвестиционных проектов в сфере развития транспортно-логистической инфраструктуры.

6. Полученные результаты создают методологическую основу для дальнейших исследований, направленных на формирование цифровых систем поддержки принятия решений в области инфраструктурного планирования и пространственного развития регионов.

Список источников

1. Гранберг А. Г. Основы региональной экономики и региональной политики. Москва : ГУ ВШЭ, 2019. 495 с.
2. Клейнер Г. Б. Системная экономика: методология и прикладные аспекты. Москва : Наука, 2020. 512 с.
3. Морозов В. Н. Стратегическое планирование развития транспортной инфраструктуры региона. Москва : Инфра-М, 2021. 286 с.
4. Кудрявцев А. А. Транспортные балансы в системе регионального планирования // Экономика региона. 2020. Т. 16, № 3. С. 742–755.
5. Суслов В. И., Мельникова Л. А. Пространственное развитие и транспортная инфраструктура регионов России. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2021. 368 с.
6. Афанасьев В. Г. Программно-целевое управление развитием территорий. Москва : Юрайт, 2019. 304 с.
7. Родионов И. И. Экономика инфраструктурных отраслей и инвестиционное планирование. Москва : Юрайт, 2021. 320 с.
8. Бабуринов В. Л. Транспортная география и пространственная организация экономики. Москва : Юрайт, 2020. 342 с.
9. Фролов Д. П. Временные факторы в региональном стратегическом планировании // Региональная экономика и управление. 2022. № 4. С. 88–101.
10. О Стратегии социально-экономического развития Новосибирской области на период до 2030 года : Постановление Правительства Новосибирской области от 19.03.2019 № 105-п // Официальный интернет-портал правовой информации. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/5400201903210003> (дата обращения: 25.03.2026).
11. Дорожное хозяйство и транспорт Новосибирской области в 2024 году // Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Новосибирской области : [сайт]. URL: <https://54.rosstat.gov.ru/folder/32621> (дата обращения: 25.03.2026).

References

1. Granberg A. G. Fundamentals of regional economics and regional policy. Moscow: Higher School of Economics; 2019. 495 p. (In Russ.)
2. Kleiner G. B. Systemic economics: methodology and applied aspects. Moscow: Nauka; 2020. 512 p. (In Russ.)
3. Morozov V. N. Strategic planning of regional transport infrastructure development. Moscow: INFRA-M; 2021. 286 p. (In Russ.)
4. Kudryavtsev A. A. Transport balances in the regional planning system. *Economy of Region*. 2020;16(3):742–755. (In Russ.)
5. Suslov V. I., Melnikova L. A. Spatial development and transport infrastructure of Russian regions. Novosibirsk: Publishing house of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2021. 368 p. (In Russ.)
6. Afanasyev V. G. Program-target management of territorial development. Moscow: Yurait; 2019. 304 p. (In Russ.)
7. Rodionov I. I. Economics of infrastructure industries and investment planning. Moscow: Yurait; 2021. 320 p. (In Russ.)
8. Baburin V. L. Transport geography and spatial organization of the economy. Moscow: Yurait; 2020. 342 p. (In Russ.)
9. Frolov D. P. Time factors in regional strategic planning. *Regional Economy and Management*. 2022;(4):88–101. (In Russ.)

10. On the Strategy of Socio-Economic Development of the Novosibirsk Region for the Period up to 2030: Decree of the Government of the Novosibirsk Region No. 105-p dated 19.03.2019. *Official Internet Portal of Legal Information: [site]*. (In Russ.). URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/5400201903210003>.

11. Road Economy and Transport of the Novosibirsk Region in 2024. *Territorial Body of the Federal State Statistics Service for the Novosibirsk Region: [site]*. (In Russ.). URL: <https://54.rosstat.gov.ru/folder/32621/>.

Информация об авторе

Н. В. Бергер – аспирант кафедры «Экономика транспорта» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the author

N. V. Berger – Postgraduate Student of the Transport Economics Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 10.02.2026; одобрена после рецензирования 24.03.2026; принята к публикации 02.06.2026.

The article was submitted 10.02.2026; approved after reviewing 24.03.2026; accepted for publication 02.06.2026.

Научная статья
УДК 656.135.2
doi:10.52170/1815-9265_2026_80_13

Моделирование влияния городского распределительного центра на общий пробег грузовых автомобилей

Анна Павловна Гrefенштейн

Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия, anna_020295@mail.ru

Аннотация. Важнейшими принципами городской логистики являются координация и консолидация. Считается, что они могут быть реализованы при создании городского распределительного центра или их сети. Теоретически функционирование такого центра должно привести к сокращению общего объема движения грузовых автомобилей в рассматриваемом районе города. Статья посвящена описанию признаков реализации данных принципов. Цель исследования – оценить влияние координации деятельности разных грузополучателей, консолидации партий их грузов на изменение конкретного параметра – общего пробега грузовых автомобилей в реальных условиях организации перевозок.

Предложен алгоритм моделирования городской доставки в специальном программном обеспечении. С его помощью выполнены эксперименты по четырем сценариям с тремя параметрами спроса на доставку товаров в рамках района г. Новосибирска. Настройки сценариев и запросов определяют различные ограничения на совместную доставку грузов разных клиентов в одном транспортном средстве. В статье подтверждена зависимость уменьшения общего пробега грузового транспорта от числа компаний-клиентов городского распределительного центра (уровень участия) и числа совместно доставляемых партий грузов (уровень консолидации). Установлена зависимость влияния принадлежности партий грузов на построение совместных маршрутов доставки.

Сделан вывод, что при одинаковых уровнях участия и консолидации сократить общий объем движения автомобилей можно за счет объединения партий грузов, принадлежащих не одной компании, а разным коммерческим предприятиям. Таким образом, важно, чтобы услугами городского распределительного центра пользовались разные сетевые торговые компании, но с одинаковыми характеристиками грузопотоков.

Ключевые слова: координация, консолидация, городской распределительный центр, общий пробег, грузовой автомобиль

Для цитирования: Гrefенштейн А. П. Моделирование влияния городского распределительного центра на общий пробег грузовых автомобилей // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 3 (80). С. 13–22. DOI 10.52170/1815-9265_2026_80_13.

Original article

Modeling the impact of an urban consolidation center on the total truck mileage

Anna P. Grefenshteyn

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia, anna_020295@mail.ru

Abstract. The most important principles of urban logistics are coordination and consolidation. They are believed to be realized through the creation of an urban consolidation center or a network of such centers. Theoretically, the operation of such a center should lead to a reduction in the overall volume of truck traffic in the given city district. This article describes the signs of these principles' implementation. The purpose of the article is to evaluate the impact of coordinating the activities of different consignees and consolidating their cargo shipments on the change in a specific parameter – the total mileage of trucks in real transportation conditions.

An algorithm for modeling urban delivery in specialized software is proposed. Using this software, experiments were conducted across four scenarios with three parameters of demand for goods delivery within the Novosibirsk district. The scenario and demand settings determine various restrictions on the joint delivery of goods from different clients in a single vehicle. The article confirms the dependence of the reduction in the total mileage of trucks on the number of companies-clients of the urban consolidation center (level of participation) and the number of jointly delivered cargo batches (level of consolidation).

The influence of cargo lot ownership on the design of joint delivery routes was determined. It was concluded that, with equal levels of participation and consolidation, overall vehicle traffic can be reduced by consolidating

cargo lots belonging not to a single company, but to different commercial enterprises. Therefore, it is important that the services of a city distribution center be used by different retail chains with similar cargo flow characteristics.

Keywords: coordination, consolidation, urban consolidation center, total mileage, truck

For citation: Grefenshteyn A. P. Modeling the impact of an urban consolidation center on the total truck mileage. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(80):13–22. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_80_13.

Введение

Современные крупные города должны обеспечивать доступ людей к товарам, услугам и местам работы, поэтому эффективность функционирования транспортно-логистической системы (ТЛС) играет ключевую роль в содействии устойчивому развитию городских территорий.

Методы городской логистики как концепции организации и управления грузопотоками направлены на разрешение ряда проблем ТЛС, в их числе значительный объем движения грузовых автомобилей. Обычно объем движения измеряется интенсивностью, авт./ч, или пробегом, км/сут. Ожидается, что если сократить общее количество и пробег транспорта, то это приведет к положительным эффектам. Например, позволит «уменьшить величину выбросов (CO_2 , N_2O , CH_4) в окружающую среду, шумовое и визуальное загрязнение города, загрузку улично-дорожной инфраструктуры, заполнение территории города транспортными средствами (ТС) и повысить уровень безопасности движения» [1].

Существует мнение, что сократить объем движения грузовых ТС можно за счет повышения коэффициента их загрузки. Принципиально такое возможно в двух случаях: либо за счет накопления партий грузов до требуемой вместимости грузового автомобиля, либо за счет объединения отправок, принадлежащих разным клиентам, в рамках одного маршрута доставки (в логистике – «унитизация»).

В свою очередь, объединение партий грузов разных клиентов возможно, если предприятия и компании об этом заранее договорятся и *скоординируют* свою деятельность или если организация доставки в рамках города будет выполнена третьей стороной – оператором (речь об аутсорсинге). В любом случае *консолидация* партий разных грузов должна выполняться в каком-либо объекте: либо в действующем распределительном центре, либо в специальном складе оператора – городском распределительном центре (ГРЦ, термин из [1]).

Важно отметить, что спрос на складскую инфраструктуру в России неуклонно растет, о чем свидетельствуют отчеты аналитических

агентств о заключении сделок по аренде и покупке недвижимости [2, 3]. При этом больший спрос приходится на предприятия розничной и онлайн-торговли: осуществлено 58 % и 23 % сделок соответственно [3]. Крупные сетевые торговые компании на таких объектах выполняют грузопереработку, в том числе *консолидацию*, а значит, при доставке грузов внутри границ города стараются максимально использовать грузоместимость автомобилей.

Соответственно, сократить объем движения грузовых ТС за счет объединения большего числа отправок не представляется возможным исходя из условия ограничения кузова ТС по вместимости. В данной ситуации возникает вопрос о возможности уменьшения объема движения ТС за счет объединения того же числа отправок в рамках одного маршрута доставки, но принадлежащих не одной сетевой компании, а разным коммерческим структурам [4].

Влияет ли принадлежность партий доставляемых грузов на движение грузовых автомобилей? Важно ли, чьи грузы совместно доставляются? Могут ли аутсорсинг доставки «последней мили» и наличие ГРЦ снизить число и пробег грузовых ТС в городах? Данные вопросы рассмотрены в настоящем исследовании.

Таким образом, цель настоящей статьи – установить связь между *координацией* деятельности грузополучателей и *консолидацией* партий их товаров, а также оценить влияние данных факторов на изменение объема движения грузовых автомобилей в реальных условиях организации перевозок.

Материалы и методы исследования

Научную базу методов, рассматриваемых в статье, составляют предшествующие исследования [5, 6], позволяющие сформулировать R' -критерий оценки целесообразности создания ГРЦ [1] в виде формулы

$$R' = \frac{\sum_{s \in S_\alpha} \sum_{i \in D_{s\varphi_{i,s}}} \frac{L_{i,s}}{L_{i,s}} + \sum_{s \in S_{\bar{\alpha}}} \sum_{i \in D_{s\bar{h}_{i,s}}} \frac{L_{i,s}}{L_{i,s}}}{\sum_{s \in S} \sum_{i \in D_{s\bar{h}_{i,s}}} \frac{L_{i,s}}{L_{i,s}}} \leq 1, \quad (1)$$

$$R' \rightarrow \min,$$

где S – набор получателей в рассматриваемом районе города; S_α , $S_{\bar{\alpha}}$ – набор клиентов ГРЦ и

получателей, не использующих ГРЦ, соответственно; при этом $S = S_\alpha \cup S_{\bar{\alpha}}$; D_s – набор поставок партий грузов клиенту s ; $L_{i,s}$ – протяженность i -го маршрута, в рамках которого получатель s совместно обслуживается с $h_{i,s}$ получателями одной сети или $\varphi_{i,s}$ различными получателями, км [6].

Таким образом, в числителе и знаменателе выражения (1) – пробег всех грузовых ТС, которые обслуживают всех клиентов какого-либо района. Набор клиентов в числителе и знаменателе не меняется. Однако если часть клиентов S_α решит использовать ГРЦ, а другая часть $S_{\bar{\alpha}}$ откажется, то изменятся протяженности маршрутов $L_{i,s}$ для доставки $\varphi_{i,s}$ или $h_{i,s}$ партий грузов [6]. Следовательно, суммарный пробег ТС клиентов ГРЦ и получателей, не использующих его, не является суммарным пробегом ТС получателей до создания ГРЦ.

Выражение (1) означает, что функционирование центра должно привести к максимальному сокращению пробега ($R' \rightarrow \min$) всех грузовых ТС в рассматриваемом районе города: как клиентов ГРЦ, так и получателей, не использующих его, – по отношению к ситуации, когда ГРЦ не было. Целесообразно, чтобы общая протяженность всех грузовых маршрутов после создания ГРЦ максимально сократилась по отношению к текущей ситуации, соответственно:

– величина знаменателя в формуле (1) стремилась к минимуму

$$\left(\sum_{s \in S_\alpha} \sum_{i \in D_s} \frac{L_{i,s}}{\varphi_{i,s}} + \sum_{s \in S_{\bar{\alpha}}} \sum_{i \in D_s} \frac{L_{i,s}}{h_{i,s}} \right) \rightarrow \min;$$

– отношение величин общего пробега после создания и до создания ГРЦ было также минимальным: $R' \rightarrow \min$.

Принцип сокращения пробега транспорта проиллюстрирован на рис. 1.

На рис. 1, а изображена ситуация, когда сетевые компании осуществляют доставку получателям самостоятельно. На рис. 1, б – когда оператор ГРЦ *координированно* обслуживает предприятия-клиентов и *консолидирует* их грузы.

Чтобы оценить степень сокращения пробега ТС с помощью R' -критерия, в исследовании было использовано программное обеспечение по решению логистических задач anyLogistix. Такое задание требует наличия реальных исходных данных, которые, по сути, являются коммерческой тайной частных компаний, поэтому в рамках исследования было выполнено моделирование различных характерных сценариев организации перевозок.

Сценарий 1 отражает ситуацию, когда все получатели грузов в рассматриваемом районе являются клиентами ГРЦ, уровень участия $\alpha = 100\%$ [5, 6]. В данном сценарии они все могут обслуживаться *координированно* и нет прямых ограничений на совместную доставку – допустимы все комбинации *консолидации* партий грузов.

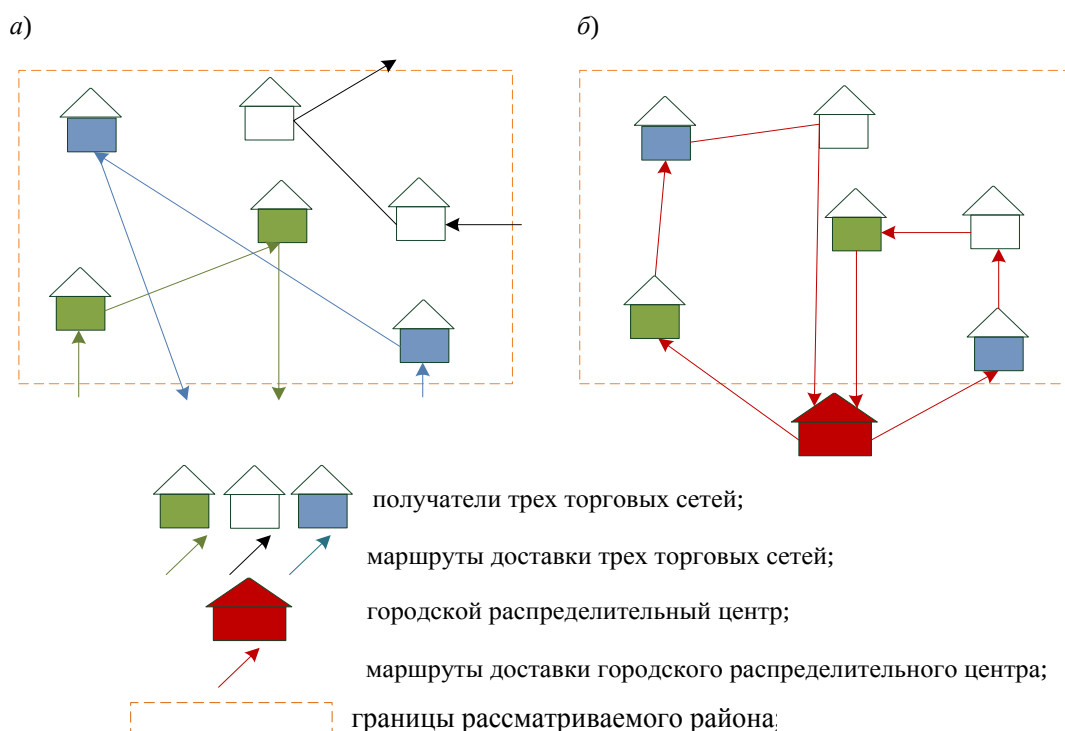


Рис. 1. Иллюстрация влияния ГРЦ на объем движения ТС:
а – до создания ГРЦ; б – при создании ГРЦ

Сценарий 2 соответствует аналогичной ситуации: $\alpha = 100 \%$, но при этом партии грузов не могут быть доставлены совместно в одном ТС, потому что, например, такие грузы имеют специфические физико-химические свойства или клиенты требуют разные «непересекающиеся» временные интервалы доставки, значит, имеются ограничения на комбинации по *консолидации* грузов из-за того, что нет *координации*.

Сценарий 3 – ситуация частичного использования услуг ГРЦ, когда лишь доля получателей моделируемого района будут являться клиентами центра (уровень участия $\alpha < 100 \%$). У этих клиентов возможны комбинации *консолидации* грузов между собой, за исключением тех получателей, которые откажутся от услуг оператора ГРЦ.

Сценарий 4 – это ситуация до создания ГРЦ при $\alpha = 0 \%$ (см. рис. 1, а), когда все получатели района обслуживаются самостоятельно и *консолидируют* собственные отправки по правилам компании.

Отметим, что используемое программное обеспечение позволяет учитывать реальные условия реализации перевозок (табл. 1) и получать набор маршрутов с минимальным суммарным пробегом в сценарии. Такой функционал называется «транспортный оптимизационный эксперимент» (ТО-эксперимент). Программа не учитывает влияние внешних или случайных факторов, например транспортных

происшествий, загрузки улично-дорожной сети, временных ограничений движения из-за работы служб.

Опишем подробно, как выполнена адаптация групп параметров в программе для моделирования функционирования ГРЦ.

1. Клиенты (Customers). На ГИС-карте, которая автоматически импортируется в модель из OpenStreetMap, размещены реальные получатели четырех известных торговых сетевых компаний. В тексте статьи (рис. 2, а) им присвоены буквенные обозначения «Я», «П», «МР» и «М». Соответствующие объекты в программе (см. рис. 2, б) созданы по фактическим адресам работы магазинов в г. Новосибирске.

2. Распределительные центры (DCs). Места расположения складских объектов влияют на то, по каким улицам и дорогам в рассматриваемом районе будет осуществляться ввоз товаров, а также развоз внутри него [7, 8], что для комфортной городской среды особо важно.

В моделируемых сценариях принято следующее:

– ГРЦ размещен в промышленно-складской зоне, что соответствует ввозу грузов в рассматриваемую зону из точки 1 (см. рис. 2, а);

– собственные распределительные центры сетевых компаний размещены в фактических местах, что соответствует ввозу грузов для сети «М» – точке 1, а для остальных – точке 2 (см. рис. 2, а).

Таблица 1

Некоторые особенности ТО-экспериментов

Группа параметров	Описание
Клиенты (Customers)	ГИС-карта реального города импортируется из OpenStreetMap, на ней можно создавать объекты (получателей, склады), исключать из сценариев и включать в них
Распределительные центры (DCs)	
Спрос (Demand)	Задается тип спроса, например периодический (Periodic demand), и параметры спроса, например количество требуемой продукции (Quantity) каждого вида, а также интервал заказа (Order interval)
Пути (Paths)	Задаются ограничения на комбинации связей между объектами, тип (Cost calculation), например километровый (Distance-based), и формула (Cost Calculation Parameters) калькуляции расходов, параметры ТС (Vehicle Type), способ определения расстояний (кратчайшее или фактическое)
Период (Period)	Задаются даты начала и конца периода моделирования, т. е. его продолжительность, например неделя
Продукция (Products)	Задаются наименования и единицы измерения объема доставляемых грузов (кг, м ³ , шт.)
Транспортные средства (Vehicle Types)	Задаются вместимость (Capacity), единицы измерения вместимости (Capacity Unit), скорость движения ТС
Оптимизационный эксперимент (TO-Experiment)	Максимальное число получателей на маршруте; не учитывает настройки «Транспортные средства» (Vehicle Types)
То же с ограничениями (Capacitated TO-Experiment)	Минимальный коэффициент использования грузоподъемности для назначения прямого маршрута (Direct Shipment); временные окна (Time Windows)

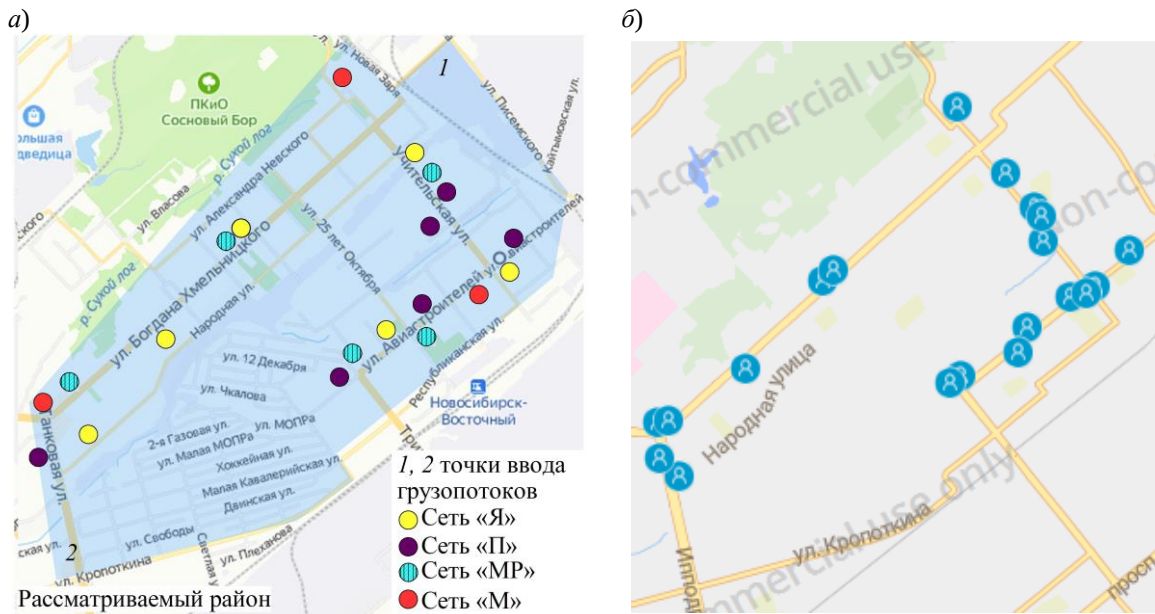


Рис. 2. Рассматриваемый район города:
а – схема моделирования; б – фрагмент работы в программе

Указанное выше означает, что распределительные центры (DCs) как объекты модели созданы в точках 1, 2 и являются местами отсчета пробега ТС. Это важно, чтобы учитывать протяженность маршрутов доставки именно в конкретном рассматриваемом районе города [4–6].

3. Пути (Paths). Эта группа параметров позволяет «жестко» зафиксировать пути (комбинации связей) только между теми объектами (получателями), которые в моделируемых сценариях нужно *координированно* обслуживать и чьи грузы можно *консолидировать*.

На рис. 3 изображен пример для сравнения. На рис. 3, а приведена ситуация, когда только клиенты s_1 и s_5 (синий), s_4 и s_6 (белый) обслуживаются оператором ГРЦ, на рис. 3, б – поставки всем клиентам *скоординированы* и совместно доставляются партии грузов всех клиентов (синий, зеленый, белый).

В модели учтено, что в сценарии 1 отсутствуют ограничения на пути (Paths); в сценарии 2 разрешены связи между магазинами одной торговой сети и ГРЦ; в сценарии 4 – между ними и их собственными центрами; в сценарии 3 для клиентов ГРЦ отсутствуют ограничения, а для остальных получателей применены настройки сценария 4.

4. Транспортные средства (Vehicle Types). В модели учтены реальные параметры грузовых автомобилей грузоподъемностью 10 т и вместимостью до 20 единиц продукции (Products).

5. Продукция (Products). В исследовании в качестве единицы доставляемой партии грузов (в штуках) условно принят транспортный пакет. Его линейные параметры: высота в пределах 1 600–2 000 мм, размеры основания 1 200 × 800 мм. Объемно-массовые характеристики грузов в пакете приняты в соответствии с работами авторов [9] и составляют: 1,1–1,6 м³/т – для строительных материалов и промышленного сырья; 2,1–2,7 м³/т – для комплектующих и потребительских товаров, в числе которых продовольственные нескоропортящиеся; около 3,8 м³/т – для остальных товаров народного потребления и экспресс-отправок.

6. Спрос (Demand). Эта группа параметров учитывает, как именно модель составит комбинации партий грузов в одно ТС с конкретной вместимостью исходя из параметров спроса (заказов) магазинов на поставки [10]. Это означает, что на *консолидацию* партий грузов влияет количество продукции (*Quantity*) и интервал заказа (*Order interval*) за какой-либо период (*Periodic demand*).

Требуемые исходные данные реальных промышленных и торговых предприятий, безусловно, являются также коммерческой тайной. Поэтому четыре сценария организации перевозок смоделированы по трем типовым вариантам спроса (итого выполнено 12 разных ТО-экспериментов).

Отметим, что к конкретному получателю-магазину в рамках одного маршрута транспорт

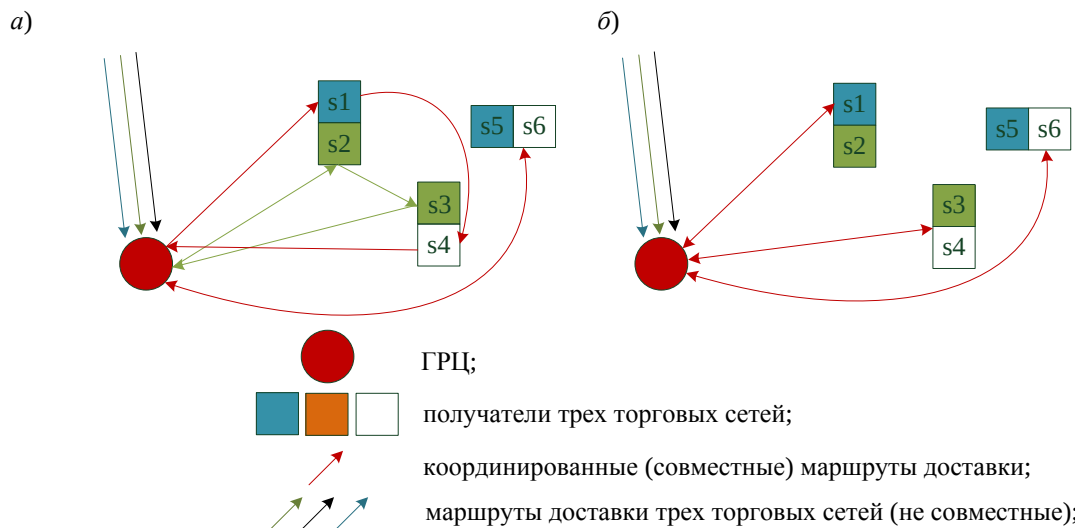


Рис. 3. Графическое сравнение реализации принципа координированного обслуживания:
 а – сценарий 2 (координированное обслуживание четырех клиентов, принадлежащих двум компаниям); б – сценарий 1 (координированное обслуживание двух партий груза одним ТС)

приезжает один раз [5], ситуации повторного заезда исключены. Поэтому в модели интервал заказа (*Order interval*) принят равным одной неделе, чтобы весь спрос клиентов был удовлетворен за раз.

Спрос 1 отражает ситуацию, когда в наборе получателей рассматриваемого района будет основной клиент ГРЦ. Количество доставляемой продукции магазинам этой торговой сети всегда занимает более половины ТС, поэтому консолидировать более двух партий грузов не представляется возможным (уровень консолидации $\phi = 2$ [5, 6]). Соответственно, к «ядру» груза основного клиента может быть добавлена только одна партия другого клиента.

Спрос 2 и 3 – это ситуации с ограничением возможности консолидации грузов исходя из вместимости ТС и параметров спроса. Спрос 2 – когда возможно объединять по две партии, а спрос 3 – по три партии соответственно.

Алгоритм моделирования составлен в виде блок-схемы (рис. 4).

7. Допущения (примечания к алгоритму).

Первое. Модель не учитывает реальные «сложившиеся» места стоянки (парковки) ТС на выгрузке. На практике часто это непосредственно проезжая часть или тротуар, что создает помехи дорожному и пешеходному движению. Модель автоматически определяет точку подъезда ко двору здания по карте через

внутренние проезды. Поэтому в величине протяженности маршрутов доставки учтены пробеги ТС для заезда во двор, данной погрешностью целесообразно пренебречь.

Второе. Модель не учитывает реальную организацию и ограничения (перекрытия, коммунальные аварии) движения по улично-дорожной сети, поэтому иногда общая протяженность маршрутов может быть некорректной: как завышенной, так и заниженной. Такими неточностями пренебрегать нецелесообразно, и необходим анализ построенных маршрутов и ручная корректировка.

На рис. 5, а показан отрисованный в модели маршрут, однако в реальных условиях ТС по нему не представляется возможным проехать из-за наличия реки. Данный маршрут был перестроен по основным улицам района, и его реальная протяженность увеличилась.

Третье. Программа моделирования всегда начинает и замыкает прорисовку маршрутов на объектах распределительных центров (DCs). Из-за этой настройки возможен дополнительный пробег ТС вне границ рассматриваемой области, который не нужно учитывать для формулы (1) по принципам городской логистики [11]. В этом случае целесообразно изменить расположение объектов DCs в сценарии (рис. 5, б – дополнительный разворот; рис. 5, в – разворот исключен за счет смещения иконки объекта в модели).

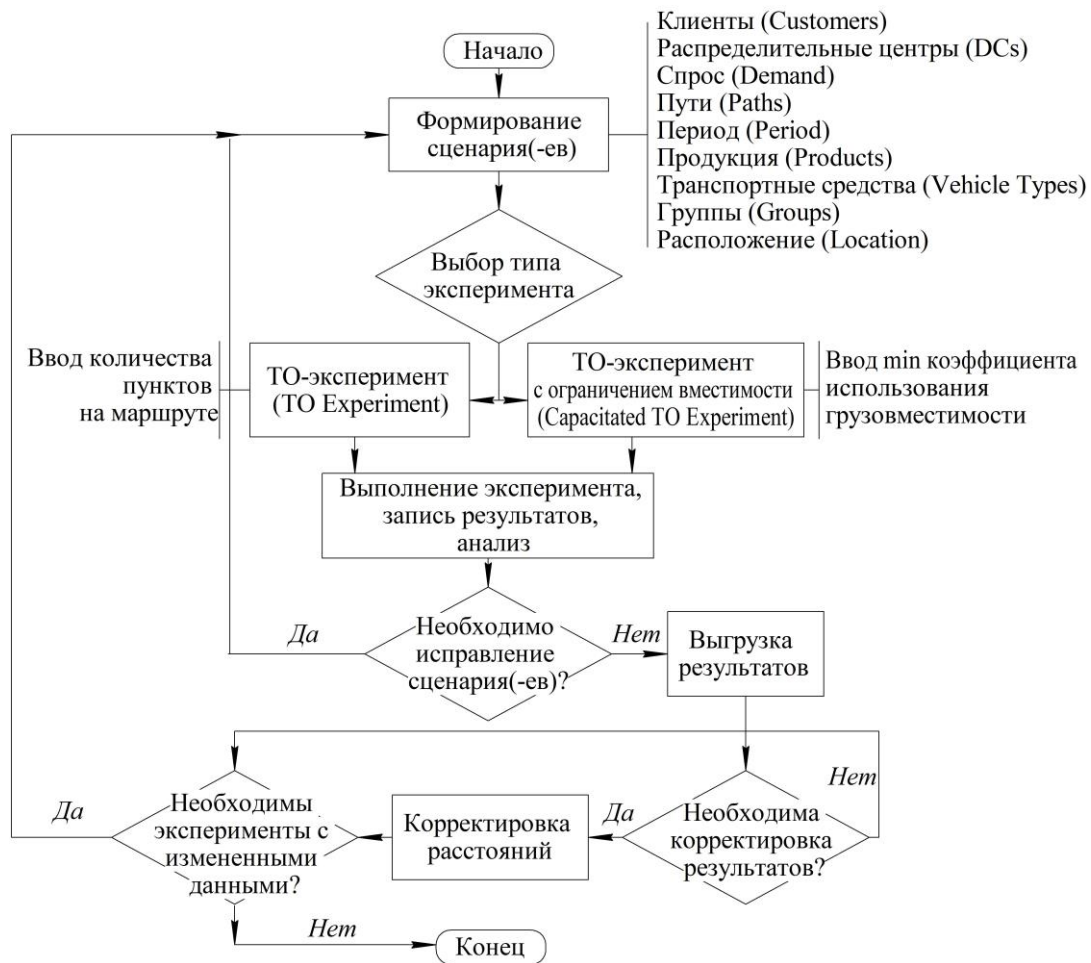


Рис. 4. Алгоритм моделирования

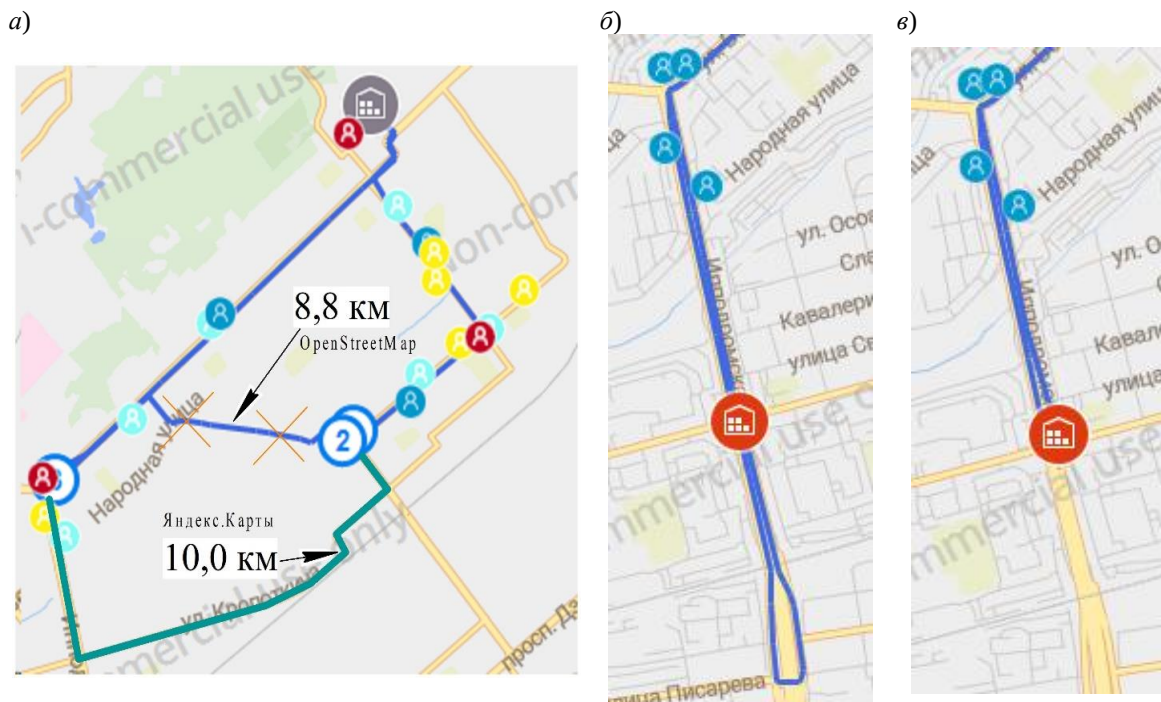


Рис. 5. Примеры результатов работы в программе:
а – перестроенный маршрут; б – до корректировки объекта; в – после корректировки объекта

Результаты исследования

Результаты моделирования: ТО-эксперимент (ТО-Experiment) и ТО-эксперимент с ограничениями (Capacitated TO-Experiment), выводы приведены в обобщенном виде.

Результаты ТО-эксперимента при изменении φ и α (рис. 6) говорят о том, что в целом при увеличении уровня консолидации партий грузов φ любых получателей, даже при разном числе (доле α) клиентов ГРЦ, снижается объем движения грузовых автомобилей в рассматриваемом районе города.

Результаты ТО-эксперимента при изменении α (рис. 7) свидетельствуют о том, что на общий пробег влияет, чьи конкретно грузы *консолидируются*, потому что принадлежность совместно доставляемых партий товаров связана с расположением пунктов доставки на маршруте ТС.

Так, в экспериментах «выключалась» одна торговая сеть магазинов, реализующая доставку самостоятельно, без ГРЦ. При одинаковых параметрах (уровне участия клиентов в

технологии: 14 из 20, $\alpha = 70\%$; объемах спроса на продукцию; вместимости ТС) результат сокращения пробега менялся на 12–16 %.

Результаты ТО-эксперимента с ограничениями (табл. 2) описывают характер влияния работы ГРЦ на критерий оптимизации – общий пробег ТС.

В сценарии 1, когда все получатели обслуживаются *координированно* ГРЦ и нет ограничений *на консолидацию*, общий пробег автомобилей минимален по сравнению с другими сценариями и $R' \rightarrow \min$ по формуле (1).

В сценарии 4 инсорсинга доставки пробег транспорта принял максимальные значения, несмотря на консолидацию партий грузов, принадлежащих одной торговой сети. То есть важно не только, сколько партий грузов доставляется вместе, но и чьи грузы перевозятся в одном ТС. Соответственно, в рамках городской логистики ГРЦ приносит лучший результат, чем собственные распределительные центры компаний.

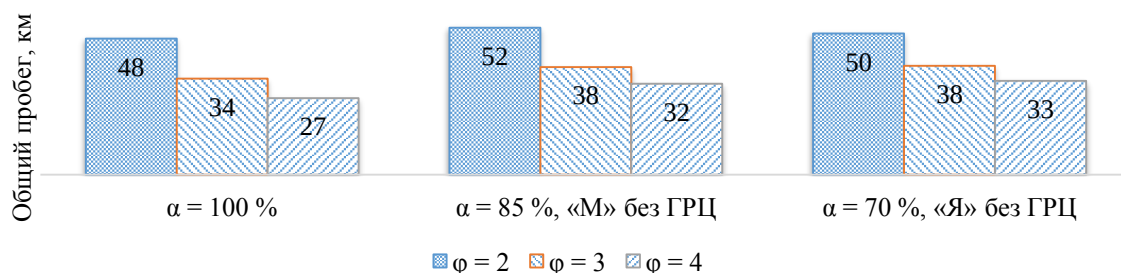


Рис. 6. Результаты ТО-эксперимента при изменении φ и α

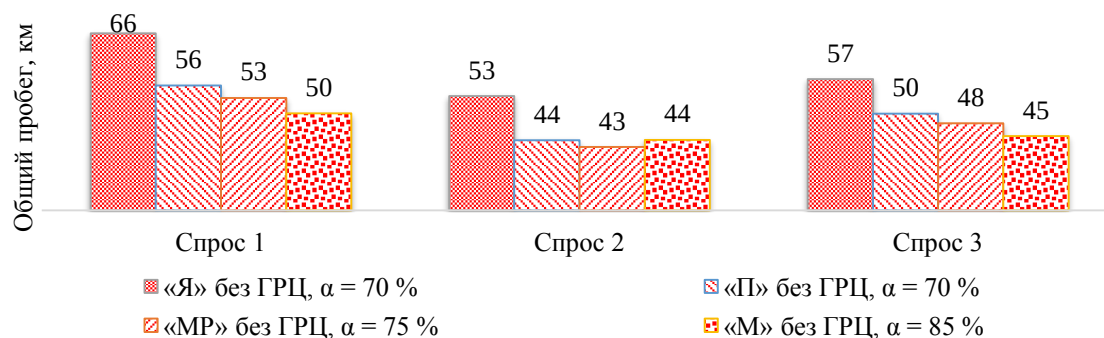


Рис. 7. Результаты ТО-эксперимента при изменении α

Таблица 2

Результаты ТО-эксперимента с ограничениями (Capacitated TO Experiment)

Спрос	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3	Сценарий 4
1	47 км, $R' = 0,57$	66 км, $R' = 0,80$	66 км, $R' = 0,80$	82 км
2	45 км, $R' = 0,63$	62 км, $R' = 0,86$	57 км, $R' = 0,79$	72 км
3	37 км, $R' = 0,54$	59 км, $R' = 0,87$	53 км, $R' = 0,78$	68 км

В сценарии 2, когда все получатели заключили договоры на обслуживание оператором ГРЦ, но *скоординировать* это обслуживание невозможно (разные режим работы, физико-химические свойства грузов), из-за чего не представляется возможным *консолидировать* все партии грузов, пробег ТС вырос на 40 %, 37 % и 59 % относительно сценария 1 для каждого спроса соответственно. То есть при невозможности *координации* и *консолидации* партий грузов всех получателей результативность ГРЦ уменьшается.

В сценарии 3, когда снизилась лояльность клиентов к ГРЦ (минус 30 %, $\alpha = 70\%$), пробег ТС сопоставим с результатами сценария 2 ($\alpha = 70\%$). Оказалось, что важно не просто вовлекать участников в технологию ГРЦ, как это считается в исследованиях [5, 6], но весьма значимы их одинаковые характеристики, должны совпадать требуемые интервалы заказа и доставки, грузы. В противном случае общий пробег ТС сокращается незначительно. Таким образом, *консолидация без координации* менее результативна и ГРЦ целесообразны для торговых предприятий-магазинов.

Выводы и обсуждение результатов исследования

В статье определены закономерности влияния реализации принципов *координации* и *консолидации* через создание ГРЦ на изменение объема движения грузовых автомобилей, который оценивается величиной их общего пробега.

Для этого разработан алгоритм моделирования в программном обеспечении anyLogistix, которое по умолчанию не учитывает особенности функционирования такого объекта, как ГРЦ. Для существующего района города с учетом ре-

альных данных выполнена апробация модели по разработанному алгоритму.

При выполнении экспериментов достигнут результат максимального снижения общего пробега ТС при *скоординированном* обслуживании получателей оператором ГРЦ. То есть аутсорсинг «последней мили» и наличие ГРЦ позволяют снизить движение ТС в городах.

Консолидация партий грузов разных торговых сетей позволяет достичь большего сокращения пробега ТС за счет наиболее близкого расположения разных получателей по сравнению с объектами одной торговой сети, удаленными друг от друга. То есть принадлежность партий доставляемых грузов оказывает влияние на движение грузовых автомобилей, и в конечном итоге важно, чьи грузы совместно доставляются. На результат также оказывает влияние характер и объемы спроса на грузы, особенности их физико-химических свойств, ограничения по грузопместимости транспорта и режимы работы клиентов.

Результаты исследования применимы к любым условиям реализации перевозок, всем городам мира и их отдельным районам. Алгоритм позволяет с помощью моделирования заранее проверить целесообразность концепции ГРЦ, без капиталоемких и трудоемких издержек. Данные результаты могут использоваться в образовательном процессе для изучения технологии организации логистики распределения.

Направлением будущих исследований автора является моделирование сложных комбинированных сценариев с разнородной (по степени совместимости) структурой грузопотоков и разным уровнем участия клиентов в технологии.

Список источников

1. Псеровская Е. Д., Грефенштейн А. П. Формализация подхода к оценке целесообразности организации городских распределительных центров // Недропользование и транспортные системы. 2023. Т. 13, № 1. С. 4–11. <https://doi.org/10.18503/SMTS-2023-13-1-4-11>.
2. Демин В. А. Методология планирования, организации и управления терминально-складскими комплексами в транспортно-логистических системах : специальность 05.22.10 «Эксплуатация автомобильного транспорта» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Демин Василий Александрович. Москва, 2019. 306 с.
3. Рынок складской недвижимости России : аналитический отчет Knight Frank. 2020. 7 с. URL: https://media.kf.expert/lenta_analytics/0/307/report.pdf (дата обращения: 13.04.2026).
4. Грефенштейн А. П. Обоснование целесообразности создания распределительного центра в условиях взаимодействия разных видов транспорта // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 1 (60). С. 68–75. DOI 10.52170/1815-9265_2022_60_68.
5. Mepparambath R. M., Cheah L., Courcoubetis C. A theoretical framework to evaluate the traffic impact of urban freight consolidation centres // Transportation Research. 2021. Part E, no. 145. P. 102134.

6. Псеровская Е. Д., Грешенштейн А. П. Оценка эффективности распределительного центра при разных вариантах консолидации грузопотоков // *Транспорт Урала*. 2021. № 3 (70). С. 22–27. DOI 10.20291/1815-9400-2021-3-22-27.
7. Петренева Е. А. Контейнерные перевозки как метод логистического подхода // *Известия Транссиба*. 2024. № 1 (57). С. 105–115.
8. Подолинная С. Д., Король Р. Г. Определение места размещения транспортно-логистического объекта в особых экономико-географических зонах // *Транспорт Урала*. 2024. № 4 (83). С. 69–75. DOI 10.20291/1815-9400-2024-4-69-75.
9. Вакуленко С. П., Колин А. В., Прокофьев М. Н. Новая технология ускоренных грузовых перевозок железнодорожным транспортом // *Транспорт Российской Федерации*. 2014. № 2 (51). С. 47–49.
10. Гришкова Д. Ю., Басманов Д. А. Анализ показателей эффективности использования подвижного состава и транспортных модулей методом «идеальной точки» при контейнерных и контейнерных перевозках // *Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона*. 2023. № 1 (34). С. 58–63.
11. Осинцев Н. А., Рахмангулов А. Н. Устойчивое развитие логистических цепей грузопотоков. Москва : Инфра-М, 2025. 303 с.

References

1. Pserovskaya E. D., Grefenshteyn A. P. An Algorithmic approach to assessing the feasibility of the urban consolidation centers development. *Subsurface Management and Transportation Systems*. 2023;(13):4–11. (In Russ.). <https://doi.org/10.18503/SMTS-2023-13-1-4-11>.
2. Demin V. A. Methodology of planning, organization and management of terminal and warehouse complexes in transport and logistics systems. Specialty 05.22.10 ‘Operation of road transport’: dissertation for the degree of Doctor of Engineering. Moscow; 2019. 306 p. (In Russ.).
3. The Russian warehouse real estate market: analytical report by Knight Frank. 2020. 7 p. (In Russ.). URL: https://media.kf.expert/lenta_analytics/0/307/report.pdf.
4. Grefenshteyn A. P. Justification of urban consolidation centre expediency with interaction transport modes. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(60):68–75. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_60_68.
5. Mepparambath R. M., Cheah L., Courcoubetis C. A theoretical framework to evaluate the traffic impact of urban freight consolidation centres. *Transportation Research. Part E*. 2021;(145):102134 p.
6. Pserovskaya E. D., Grefenshteyn A. P. The time factor in the situational management of road transport of live poultry. *Transport of the Urals*. 2021;(70):22–27. (In Russ.). DOI 10.20291/1815-9400-2021-3-22-27.
7. Petreneva E. A. Piggyback transportation as a method of logistic approach. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2024;(57):105–115. (In Russ.).
8. Podolinnaya S. D., Korol R. G. Determining of location for transport and logistics facility in special economic and geographical zones. *Transport of the Urals*. 2024;(83):69–75. (In Russ.). DOI 10.20291/1815-9400-2024-4-69-75.
9. Vakulenko S. P., Kolin A. V., Prokofyev M. N. New technology for high-speed cargo transportation by rail. *Transport of the Russian Federation*. 2014;(51):47–49. (In Russ.).
10. Grishkova D. Yu., Basmanov D. A. Analysis of the efficiency indicators of rolling stock and transport modules by the ‘ideal point’ method in container and piggyback transportation. *Transport of the Asia-Pacific Region*. 2023;(34):58–63. (In Russ.).
11. Osintsev N. A., Rakhmangulov A. N. Sustainable development of logistics chains of cargo flows. Moscow: INFRA-M; 2025. 303 p. (In Russ.). DOI 10.12737/2133677.

Информация об авторе

А. П. Грешенштейн – кандидат технических наук, доцент кафедры «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the author

A. P. Grefenshteyn – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Logistics, Commercial Work and Rolling Stock Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 10.02.2026; одобрена после рецензирования 23.03.2026; принята к публикации 05.06.2026.

The article was submitted 10.02.2026; approved after reviewing 23.03.2026; accepted for publication 05.06.2026.

Научная статья
УДК 656.073.2:519.8
doi:10.52170/1815-9265_2026_80_23

Методика маршрутизации материальных потоков в логистике при ограничениях загрузки узлов и дифференцированной ценности грузов

Роман Юрьевич Упырь

Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия, roman.upyr@gmail.com

Аннотация. В данной статье рассматриваются подходы к разработке эффективной универсальной методики оперативного планирования маршрутов и обработки материальных потоков в различных логистических сетях с ограниченной перерабатывающей способностью узлов, позволяющей экономически обоснованно отказываться от перевозки низкорентабельных грузов при возникновении узких мест. Предложена математическая модель в виде задачи целочисленной оптимизации с целевой функцией, включающей затраты на накопление транспортных партий, обработку в узлах (с нелинейным штрафом за превышение мощности), экономию от транзита без переработки, а также альтернативную стоимость отказа от перевозки. Для решения используется итеративный эвристический алгоритм (метод динамической стабилизации), на каждом шаге фиксирующий коэффициенты загрузки и перераспределяющий потоки до сходимости. Разработанная автором модель впервые объединяет нелинейный штраф за перегрузку узлов (включенный непосредственно в целевую функцию) и возможность селективного исключения низкорентабельных отправок. Методика инвариантна к виду транспорта и может использоваться для планирования работы сортировочных станций, складов, портов и терминалов, а также для обоснования инвестиций в расширение перерабатывающей способности инфраструктуры. В отличие от действующих нормативных документов ОАО «РЖД», где штраф за перегрузку вводится лишь как временный вычислительный прием и исключается из итоговой оценки, а все потоки считаются обязательными к освоению, предложенная методика позволяет ранжировать грузопотоки по ценности и принимать экономически обоснованные решения об отказе от перевозки в условиях дефицита ресурсов, что особенно актуально в пиковые периоды.

Ключевые слова: логистика материальных потоков, маршрутизация грузов, транспортные узлы, перерабатывающая способность, план формирования поездов

Для цитирования: Упырь Р. Ю. Методика маршрутизации материальных потоков в логистике при ограничениях загрузки узлов и дифференцированной ценности грузов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 3 (80). С. 23–29. DOI 10.52170/1815-9265_2026_80_23.

Original article

A methodology for routing material flows in logistics under node load constraints and differentiated cargo value

Roman Yu. Upyr

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia, roman.upyr@gmail.com

Abstract. This article examines approaches to developing an effective universal methodology for operational route planning and material flow processing in various logistics networks with limited node processing capacity, enabling economically justified rejection of low-profitability cargo shipments when bottlenecks occur. A mathematical model is proposed in the form of an integer optimization problem with an objective function that includes costs of accumulating transport batches, node processing costs (with a nonlinear penalty for exceeding capacity), savings from transit without processing, as well as the opportunity cost of rejecting transportation. An iterative heuristic algorithm (dynamic stabilization method) is used for solution, fixing load coefficients at each step and redistributing flows until convergence. The model developed by the author uniquely combines a nonlinear penalty for node overloading (incorporated directly into the objective function) with the possibility of selectively excluding low-profitability shipments. The methodology is invariant to the mode of transport and can be used for planning operations at classification yards, warehouses, ports, and terminals, as well as for justifying investments in expanding infrastructure processing capacity. In contrast to the current regulatory documents of Russian Railways, where the overload penalty is introduced only as a temporary computational device and excluded from the final assessment, while all flows are considered mandatory for handling, the proposed methodology

allows ranking cargo flows by value and making economically justified decisions to reject transportation under resource scarcity conditions, which is particularly relevant during peak periods

Keywords: material flow logistics, cargo routing, transport nodes, processing capacity, train formation plan

For citation: Upyr R. Yu. A methodology for routing material flows in logistics under node load constraints and differentiated cargo value. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(80):23–29. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_80_23.

Введение

Эффективность функционирования транспортно-логистических сетей напрямую зависит от рациональной организации материальных потоков: выбора маршрутов следования грузовых партий, определения пунктов их накопления и переработки, а также распределения ограниченных ресурсов узлов инфраструктуры. Классические методики маршрутизации обычно стремятся минимизировать сумму операционных затрат при фиксированном объеме перевозок [1–3], предполагая неограниченную пропускную и перерабатывающую способность узловых элементов. Однако на практике сортировочные центры, склады, порты и терминалы обладают конечной перерабатывающей способностью. В пиковые периоды превышение этой способности ведет к сверхнормативным простоям и росту удельных издержек на обработку [4]. Кроме того, разные составляющие грузопотока обладают неодинаковой экономической ценностью – при возникновении узких мест в сети разумным управленческим решением может стать отказ от перевозки наименее доходных или наименее критичных партий груза, даже если это сопряжено с уплатой штрафных санкций или альтернативными потерями.

Следует отметить, что фундаментальные исследования в области организации материальных потоков нашли отражение и в организации железнодорожных перевозок, которые традиционно фокусируются на проблеме выбора расчетных значений транспортных потоков для составления плана формирования поездов (ПФП), в частности в работах [5–11]. Авторы статьи [6] убедительно доказывают вероятностную природу колебаний объемов перевозок и предлагают перейти от детерминированного использования средних суточных величин к расчетам на основе математического ожидания струи вагонопотока с учетом законов распределения и рода груза. Такой подход позволяет существенно повысить точность прогнозирования необходимых ресурсов для освоения перевозок. Однако в рамках данной методологии все прогнозируемые вагонопотоки рассматриваются

как обязательные к освоению; вопрос о возможности экономически обоснованного отказа от перевозки части грузов в условиях дефицита перерабатывающих мощностей не ставится. Кроме того, в указанных моделях не учитывается обратное влияние перегрузки станций на рост удельных затрат по обработке вагонов и, как следствие, на экономическую эффективность выбранного варианта ПФП.

Анализ методических основ, заложенных в действующих нормативных документах и учебных пособиях, в частности в фундаментальном труде [7], показывает, что именно там сформулированы базовые принципы, получившие развитие в настоящей статье. В пособии [7] детально описаны экономические критерии организации вагонопотоков: затраты на накопление составов, расходы на переработку вагонов на технических станциях и экономия от их проследования без переработки. Там же вводится понятие технически допустимых размеров переработки станций и рекомендуется использовать штрафные функции при превышении этих лимитов в ходе автоматизированных расчетов плана формирования по методу МИИТ – ВНИИАС. Указанные положения послужили отправной точкой для построения целевой функции и ограничений предлагаемой модели.

Базовым нормативным документом, регламентирующим технологию организации вагонопотоков и составления плана формирования грузовых поездов на сети железных дорог России, являются «Инструктивные указания по организации вагонопотоков на железных дорогах ОАО «РЖД»» [8]. В нем детально изложены экономические критерии эффективности организации вагонопотоков, базирующиеся на сопоставлении затрат на накопление составов на станциях формирования с экономией от проследования попутных технических станций без переработки, а также на учете расходов на перемещение вагонов по участкам. Ключевым принципом, заложенным в указаниях, является поиск такого распределения вагонопотоков по сети допустимых назначений, при котором суммарные стоимостные оценки накопления, перера-

ботки и продвижения вагонов минимальны при соблюдении заданных ограничений по пропускным и перерабатывающим способностям станций и участков.

Фундаментальная методика, лежащая в основе [8], исходит из безусловной необходимости освоения всего предъявленного к перевозке вагонопотока. Задача сводится к поиску оптимального варианта организации поездов при фиксированном объеме работы, а вопрос об экономически обоснованном отказе от перевозки части грузопотока в условиях пиковых нагрузок, когда стоимость обработки сверхнормативных объемов начинает лавинообразно расти, а сам отказ может быть экономически эффективнее принудительного продвижения, не ставится.

В отличие от классической постановки, закрепленной в распоряжении [8], где штраф за перегрузку станций вводится лишь как временный вычислительный прием и исключается из итоговой оценки, предлагаемая автором методика включает нелинейный штраф f_s непосредственно в целевую функцию и позволяет экономически обоснованно отказываться от перевозки низкорентабельных грузов при дефиците пропускной способности. При этом авторская методика разделяет с нормативным документом базовые принципы учета затрат на накопление, переработку и экономии от транзита, однако для практической реализации на железнодорожной сети требует калибровки обобщенных параметров A , B , E на основе поучастковых расходных

ставок, а также пересмотра положения об обязательности освоения всего вагонопотока.

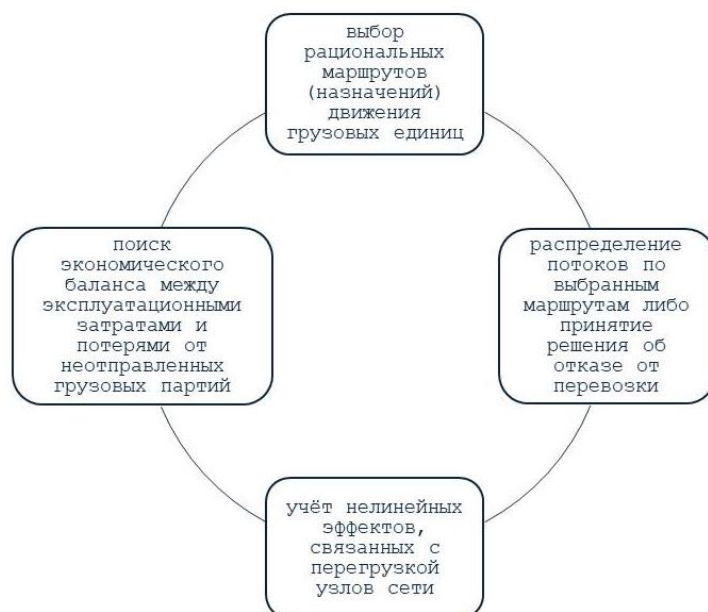
Вместе с тем классическая методика, изложенная в работах [5–7, 9–15], исходит из безусловной необходимости освоения всего предъявленного вагонопотока. Задача сводится к поиску такого распределения потоков по сети допустимых назначений, чтобы суммарные затраты на накопление и переработку были минимальны, а ограничения по перерабатывающей способности станций соблюдались за счет перераспределения потоков на менее загруженные узлы.

В отличие от упомянутых подходов, в настоящей работе предлагается расширенная экономико-математическая модель, которая на примере плана формирования поездов, с одной стороны, опирается на классические принципы минимизации затрат на накопление и переработку вагонов, а с другой – вводит два принципиально новых элемента:

- нелинейный штраф за превышение перерабатывающей способности станций, что отражает реальный рост издержек при возникновении очередей и сверхурочных работ;

- альтернативную стоимость отказа от перевозки (ценность вагона), позволяющую в автоматизированном режиме отсеивать наименее доходные потоки при возникновении узких мест в инфраструктуре.

Рассматриваемый автором подход позволяет решить комплекс задач оптимизации материальных потоков в обобщенной постановке (рисунок).



Комплекс задач оптимизации материальных потоков в обобщенной постановке

Методика предназначена для включения в системы поддержки принятия решений диспетчерского и логистического персонала [16] и может быть адаптирована под различные конфигурации транспортных сетей и виды транспорта.

Теоретические исследования

Рассмотрим упорядоченную по направлению движения линейную сеть, содержащую n узлов обработки (логистических центров, сортировочных пунктов, станций): $S = \{1, 2, \dots, n\}$. Индексы узлов возрастают вдоль основного направления следования материального потока. Множество грузопотоков (отправок) обозначим $F = \{1, 2, \dots, m\}$. Для каждого потока $i \in F$ задаются следующие параметры:

- узел зарождения $o_i \in S$;
- узел погашения (назначения) $d_i \in S$ (при этом $o_i < d_i$);
- суточный объем $v_i \in Z_+$ (в условных грузовых единицах, например вагонах, контейнерах, паллетах);
- ценность одной грузовой единицы $w_i \in R_+$ (ден. ед. / ед. груза).

Под ценностью одной грузовой единицы будем понимать альтернативные издержки, возникающие при отказе от транспортировки данного потока (недополученная выручка, штрафные санкции, стоимость груза, репутационные потери).

Для каждого узла s задается его перерабатывающая способность C_s (ед. груза / сут) – это максимальный объем материального потока, который узел может обработать в штатном режиме за единицу времени.

Зададим общие для сети экономические параметры: p – коэффициент штрафного удорожания обработки при превышении C_s ; T – вместимость одной транспортной единицы (поезда, грузовика, контейнеровоза), усл. ед. груза; A – удельные затраты на формирование (накопление) одной транспортной единицы на маршрут, ден. ед. / трансп. ед.; B – базовая стоимость обработки одной грузовой единицы в узле, ден. ед. / ед. груза; E – удельная экономия от проследования одной грузовой единицы промежуточного узла без обработки, ден. ед. / ед. груза на узел.

В общем случае мы закладываем обобщенную методику расчетов, но финальные параметры будут гибко масштабироваться под конкретный вид транспорта.

Для любой пары узлов $a < b$ введем понятие *прямого маршрута (назначения)* P_{ab} при котором грузовые единицы следуют от узла a до узла b без обработки (переформирования, перевалки) в промежуточных узлах.

В модели используем три группы бинарных переменных:

- $x_{ab} \in \{0,1\}$ – индикатор того, что маршрут P_{ab} действительно используется (формируется);
- $y_{i,ab} \in \{0,1\}$ – индикатор включения потока i в маршрут P_{ab} ;
- $z_i \in \{0,1\}$ – индикатор отказа от перевозки потока i .

Введем систему ограничений для задачи:

1. *Целостность выбора* – каждый грузопоток либо включается ровно в один прямой маршрут, либо отклоняется:

$$\sum_{a < b} y_{i,ab} + z_i = 1, \quad \forall i \in F. \quad (1)$$

2. *Согласованность маршрута* – поток i может быть включен в маршрут P_{ab} , только если он начинается в узле a и следует не далее узла b , причем b не должно превышать узел его конечного назначения:

$$y_{i,ab} \leq 1[a = o_i, b \leq d_i], \quad \forall i \in F, \quad \forall a < b. \quad (2)$$

3. *Активация маршрута* – если хотя бы один поток включен в P_{ab} , то этот маршрут должен быть сформирован (т. е. $x_{ab} = 1$):

$$y_{i,ab} \leq x_{ab}, \quad \forall i \in F, \quad \forall a < b. \quad (3)$$

4. *Загрузка узла обработки* – суммарный объем грузовых единиц, в операциях с которыми участвует узел s (отправление или прибытие), вычисляется как

$$L_s = \sum_{\substack{a < b \\ i: o_i=s \text{ или } d_i=s}} v_i y_{i,ab}, \quad \forall s \in S. \quad (4)$$

5. *Коэффициент загруженности* – кусочно-линейный множитель, увеличивающий удельные затраты на обработку при превышении штатной мощности узла:

$$f_s = \begin{cases} 1, & \text{если } L_s \leq C_s, \\ 1 + p \left(\frac{L_s}{C_s} - 1 \right), & \text{если } L_s > C_s. \end{cases} \quad (5)$$

6. *Объем маршрута и потребное количество транспортных единиц*

$$V_{ab} = \sum_{i \in F} v_i y_{i,ab}, \quad K_{ab} = \left\lceil \frac{V_{ab}}{T} \right\rceil. \quad (6)$$

Минимизируя суммарные суточные издержки (ден. ед. / сут), которые включают затраты на формирование транспортных партий, обработку в узлах, экономию от транзита и аль-

тернативные потери, составим целевую функцию задачи:

$$\min \left(A \sum_{a < b} K_{ab} + B \sum_{a < b} V_{ab} \frac{f_a + f_b}{2} - E \sum_{i \in F} \sum_{a < b} v_i y_{i,ab} (d_i - o_i - 1) + \sum_{i \in F} w_i v_i z_i \right), \quad (7)$$

где $A \sum_{a < b} K_{ab}$ – затраты на формирование (накопление) транспортных единиц; $B \sum_{a < b} V_{ab} \frac{f_a + f_b}{2}$ – расходы на обработку в узлах отправления и назначения, скорректированные с учетом их текущей загрузки; $E \sum_{i \in F} \sum_{a < b} v_i y_{i,ab} (d_i - o_i - 1)$ – экономия, возникающая при проследовании груза через промежуточные узлы без переработки (входит со знаком «минус»); $\sum_{i \in F} w_i v_i z_i$ – альтернативные потери от неотправленных потоков.

Ввиду нелинейности, вносимой коэффициентами f_s и операцией округления, конкретная реализация алгоритма может варьироваться. В качестве примера решающего алгоритма рассмотрим применение эвристического итеративного алгоритма для рассматриваемой задачи.

Шаг 0. Инициализация. Принимаем начальные коэффициенты загрузки $f_s^{(0)} = 1$ для всех узлов. Формируем начальное множество маршрутов (например, все прямые корреспонденции $o_i \rightarrow d_i$).

Шаг 1. Основной цикл (итерация $k = 1, 2, \dots$).

1.1. Фиксация коэффициентов. Используем значения $f_s^{(k-1)}$. Для упрощения временно линеаризуем количество транспортных единиц: $K_{ab} \approx V_{ab}/T$ (точное значение будет восстановлено на этапе постобработки).

1.2. Решение подзадачи выбора маршрутов. При фиксированных f_s решаем целочисленную линейную задачу относительно переменных $y_{i,ab}, x_{ab}, z_i$. Для сетей реальной размерности (десятки узлов, сотни потоков) в качестве исходного будем рассматривать жадный алгоритм: потоки упорядочиваются по убыванию ценности w_i и последовательно назначаются на маршрут, дающий минимальное приращение целевой функции (включая виртуальный вариант «отказ от перевозки»).

1.3. Пересчет загрузок и коэффициентов. По найденному распределению $y_{i,ab}$ вычис-

ляем объемы $L_s^{(k)}$ и новые значения $f_s^{(k)}$ по формуле (5).

1.4. Проверка сходимости. Если

$$\max_s |f_s^{(k)} - f_s^{(k-1)}| < \varepsilon, \quad (8)$$

где $\varepsilon = 0,01$ и множество активных маршрутов стабилизировалось, выходим из цикла. Иначе переходим к итерации $k + 1$.

Шаг 2. Постобработка. Для каждого маршрута P_{ab} , у которого объем перевозок $V_{ab} > 0$, вычисляется точное количество транспортных единиц $K_{ab} = [V_{ab}/T]$. Определяем итоговое значение целевой функции. Формируем выходной отчет: перечень сформированных маршрутов с указанием потребного количества рейсов, распределение грузопотоков по маршрутам, список отклоненных отправок, фактические загрузки узлов L_s и соответствующие коэффициенты f_s .

Предлагаемый алгоритм обладает следующими преимуществами, хотя и не гарантирует глобального оптимума из-за невыпуклости исходной задачи:

1) вычислительная эффективность, связанная с тем, что на каждой итерации решается задача, близкая к транспортной с бинарными решениями;

2) принятие во внимание эффекта обратной связи. Перегрузка транспортных узлов (например, железнодорожных станций) ведет к росту f_s , что на следующей итерации делает переработку на этих станциях более дорогой, и потоки перераспределяются на менее загруженные узлы или отклоняются.

Результаты исследования и их обсуждение

Предложенная методика инвариантна к физической природе грузовой единицы и транспортного средства. Под узлом обработки может пониматься участковая или сортировочная станция, распределительный склад, транспортный терминал, порт перевалки и др. Вместимость транспортной единицы T может соответствовать вагону, контейнеру, контейнеровозу, поезду или партии груза на паллетах. Экономические параметры A, B, E калибруются в соответствии с тарифной политикой и себестоимостью операций в конкретной логистической системе.

Параметр w_i играет ключевую роль в принятии решений об отказе от перевозки в условиях дефицита ресурсов. Поток i включается в план только в том случае, если расчетные затраты на

его транспортировку и обработку оказываются меньше альтернативной стоимости отказа $w_i v_i$. Для служебных, порожних или балансировочных перемещений можно задать $w_i = 0$, что приведет к их автоматическому отклонению при любой положительной стоимости перевозки.

Если загрузка узла L_s превышает его штатную мощность C_s , коэффициент f_s становится больше единицы. На следующей итерации это повышает стоимость обработки в данном узле, что стимулирует алгоритм либо перераспределять потоки на альтернативные, менее загруженные узлы, либо отказываться от низкоценных отправок. Такой подход позволяет имитировать влияние заторов и деградацию производительности сети при пиковых нагрузках.

Выводы

Разработанная методика представляет собой универсальный инструмент оптимизации маршрутизации материальных потоков в логистических сетях с ограниченными ресурсами узлов. Основные научные результаты проведенных исследований заключаются в следующем:

1. Разработана экономико-математическая модель маршрутизации материальных потоков, отличающаяся от классических постановок (в том числе закрепленных в нормативных документах ОАО «РЖД») одновременным учетом двух факторов: нелинейного роста удельных затрат на обработку при превышении перерабатывающей способности узлов и возможности экономически обоснованного отказа от перевозки низкорентабельных грузовых партий. Это позволяет формировать план перевозок, адекват-

ный реальным условиям возникновения узких мест в инфраструктуре.

2. Предложен итеративный эвристический алгоритм (метод динамической стабилизации), обеспечивающий сходимость решения при нелинейной целевой функции. Алгоритм имитирует обратную связь между загрузкой узлов и стоимостью обработки, что приводит к автоматическому перераспределению потоков на менее загруженные элементы сети или к отсеvu наименее ценных грузов.

3. Предложенная методика инвариантна к виду транспорта и типу грузовых единиц, что позволяет применять ее для оперативного планирования в мультимодальных логистических сетях, включающих сортировочные станции, порты, склады и транспортные терминалы. Параметры модели (A , B , E , T) калибруются под конкретную технологию и тарифную политику, а вычислительная схема может быть интегрирована в системы поддержки принятия решений диспетчерского персонала.

4. Практическая значимость работы заключается в создании инструментария, который, в отличие от действующих инструктивных указаний, позволяет не только распределять потоки по сети, но и оценивать экономическую целесообразность освоения всего предъявленного объема перевозок в пиковые периоды. Это дает возможность снизить непроизводительные потери от сверхурочных работ и очередей, а также обосновать инвестиции в расширение перерабатывающей способности инфраструктурных объектов на основе количественного анализа дефицита ресурсов.

Список источников

1. Ahuja R. K., Magnanti T. L., Orlin J. B. Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications. New Jersey : Prentice Hall, 1993. 846 p.
2. The Vehicle Routing Problem. Philadelphia : Society for Industrial and Applied Mathematics. 2002. 367 p.
3. Зак Ю. А. Математические модели и алгоритмы построения эффективных маршрутов доставки грузов. Москва : Русайнс, 2024. 304 с.
4. Кочнева Д. И., Высотский С. В. Оценка и прогнозирование потерь в логистической цепи железнодорожных контейнерных перевозок // Известия Транссиба. 2025. № 2 (62). С. 59–66.
5. Правдин Н. В., Дыканюк М. Л., Негрей В. Я. Прогнозирование грузовых потоков. Москва: Транспорт, 1987. 247 с.
6. Правдин Н. В., Дорошко С. В. Расчетные вагонопотоки для разработки плана формирования поездов // Вестник Белорусского государственного университета транспорта : Наука и транспорт. 2016. № 2 (33). С. 26–31.
7. Бородин А. Ф., Батурин А. П., Панин В. В. Организация вагонопотоков. Москва : МИИТ, 2008. 192 с.
8. Инструктивные указания по организации вагонопотоков на железных дорогах ОАО «РЖД» : утверждены распоряжением ОАО «РЖД» № 2872/р от 29.12.2018. Москва, 2018. 548 с.
9. Шапкин И. Н., Юсипов Р. А., Кожанов Е. М. Нормирование и прогнозирование на железных дорогах (методы, алгоритмы, технологии, расчеты). Москва : ИСПИ РАН, 2007. 255 с.
10. Акулиничев В. М. Организация вагонопотоков. Москва : Транспорт, 1979. 223 с.

11. Иванков А. Н. Совершенствование методов расчета плана формирования поездов : специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Иванков Алексей Николаевич. Москва, 2002. 165 с.
12. Ковалев В. И. Организация вагонопотоков на сети железных дорог России в условиях реформирования отрасли. Санкт-Петербург : Выбор, 2002. 144 с.
13. Порядок применения экономической оценки для автоматизированного расчета плана формирования грузовых поездов : утвержден распоряжением ОАО «РЖД» № 1825/р от 26.08.2020. Москва, 2020. 548 с.
14. Powell W. B. Approximate Dynamic Programming: Solving the Curses of Dimensionality. New York : John Wiley & Sons, 2011. 627 p.
15. Никифорова А. А., Дудакова А. В., Упырь Р. Ю. Параметрическая оценка затрат на накопление состава грузового поезда // Молодая наука Сибири. 2026. № 1 (31). С. 43–48.
16. Упырь Р. Ю., Дудакова А. В. Моделирование работы сервиса быстрого реагирования для обеспечения работы терминально-складских комплексов // Известия Транссиба. 2024. № 2 (58). С. 72–81.

References

1. Ahuja R. K., Magnanti T. L., Orlin J. B. Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications. New Jersey: Prentice Hall; 1993. 846 p.
2. The Vehicle Routing Problem. Ed. by P. Toth, D. Vigo. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics; 2002. 367 p.
3. Zak Yu. A. Mathematical models and algorithms for constructing efficient cargo delivery routes: textbook. Moscow: Rusains; 2024. 304 p. (In Russ.).
4. Kochneva D. I., Vysotsky S. V. Assessment and forecasting of losses in the logistics chain of railway container transportation. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2025;(62):59–66. (In Russ.).
5. Pravdin N. V., Dykanyuk M. L., Negrey V. Ya. Forecasting freight flows. Moscow: Transport; 1987. 247 p. (In Russ.).
6. Pravdin N. V., Doroshko S. V. Estimated car flows for developing a train formation plan. *Bulletin of the Belarusian State University of Transport: Science and Transport*. 2016;(33):26–31. (In Russ.).
7. Borodin A. F., Baturin A. P., Panin V. V. Organization of car flows: textbook. Moscow: MIIT; 2008. 192 p. (In Russ.).
8. Instructional guidelines on the organization of car flows on the railways of Russian Railways. Approved by Order of Russian Railways No. 2872/r dated 29.12.2018. (In Russ.).
9. Shapkin I. N., Yusipov R. A., Kozhanov E. M. Regulation and forecasting on railways (methods, algorithms, technologies, calculations). Moscow: ISPI RAS; 2007. 255 p. (In Russ.).
10. Akulinichev V. M. Organization of car flows. Moscow: Transport; 1979. 223 p. (In Russ.).
11. Ivankov A. N. Improving methods for calculating train formation plans. Specialty 05.22.08 ‘Transportation process managements’: dissertation for the degree of Candidate of Engineering. Moscow; 2002. 165 p. (In Russ.).
12. Kovalev V. I. Organization of car flows on the Russian railway network under industry reform conditions. St. Petersburg: Vybor; 2002. 144 p. (In Russ.).
13. Procedure for applying economic assessment for automated calculation of the freight train formation plan. Approved by Order of Russian Railways No. 1825/r dated 26.08.2020. (In Russ.).
14. Powell W. B. Approximate Dynamic Programming: Solving the Curses of Dimensionality. New York: John Wiley & Sons; 2011. 627 p.
15. Nikiforova A. A., Dudakova A. V., Upyr R. Yu. Parametric assessment of costs for accumulating a freight train composition. *Young Science of Siberia*. 2026;(31):43–48. (In Russ.).
16. Upyr R. Yu., Dudakova, A. V. Modeling the operation of a rapid response service to support terminal and warehouse complexes. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2024;(58):72–81. (In Russ.).

Информация об авторе

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

Information about the author

R. Yu. Upyr – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Operational Work Department, Irkutsk State Transport University.

Статья поступила в редакцию 16.04.2026; одобрена после рецензирования 25.05.2026; принята к публикации 05.06.2026.

The article was submitted 16.04.2026; approved after reviewing 25.05.2026; accepted for publication 05.06.2026.

Научная статья
УДК 624.159.2
doi:10.52170/1815-9265_2026_80_30

Формирование технических маршрутов в динамической среде управления перевозочным процессом

Наталья Александровна Ковалева¹, Ольга Вениаминовна Муленко²,
Аскер Измуудинович Хашев³✉

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

¹ nvihreva@gmail.com

² mikasya@yandex.ru

³ hash-93@mail.ru✉

Аннотация. В статье рассматривается проблема выбора станции формирования технических маршрутов в условиях ограничений пропускной и перерабатывающей способности инфраструктуры припортовых направлений. На основе функциональных возможностей Единой модели данных перевозочного процесса управления эксплуатационной работой (ЕМД ПП УЭР) разработана многокритериальная модель и алгоритм динамического формирования технических маршрутов в адрес одного грузополучателя. Предложенный подход опирается на интеграцию данных о дислокации вагонопотоков, инфраструктурных ограничениях и прогнозных параметрах движения поездов, что позволяет осуществлять выбор станции формирования маршрута с учетом текущих параметров перевозочного процесса. Приведена формализация целевой функции, включающей эффекты сокращения времени оборота вагонов, повышения уровня маршрутизации и изменения эксплуатационных затрат. В модели учитываются экономические и технологические факторы, связанные с пропускной способностью участков, перерабатывающей способностью станций, условиями формирования маршрутов в адрес припортовых железнодорожных узлов и особенностями организации вагонопотоков на подходах к ним. Дополнительно учтено влияние неравномерности подвода вагонов, уровня загрузки инфраструктуры и технологических ограничений станционной работы на выбор рационального варианта маршрутизации. Выполнена оценка эксплуатационно-экономических эффектов на примере зерновых перевозок в адрес припортовой станции Н при альтернативных вариантах выбора станции формирования маршрута. Установлено, что применение алгоритма в контуре ЕМД ПП УЭР обеспечивает переход от статического планирования к динамическому режиму поддержки принятия решений, повышает устойчивость подвода вагонов к припортовым станциям, способствует рационализации вагонопотоков, снижению переработки составов в припортовых узлах и повышению эффективности эксплуатационной работы в условиях ограниченной инфраструктурной мощности.

Ключевые слова: Единая модель данных перевозочного процесса управления эксплуатационной работой, технический маршрут, маршрутизация вагонопотоков, припортовые станции, динамическое планирование, многокритериальная оптимизация, пропускная способность

Для цитирования: Ковалева Н. А., Муленко О. В., Хашев А. И. Формирование технических маршрутов в динамической среде управления перевозочным процессом // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 3 (80). С. 30–38. DOI 10.52170/1815-9265_2026_80_30.

Original article

Formation of technical routes in a dynamic transportation management environment

Natalya A. Kovaleva¹, Olga V. Mulenko², Asker I. Khashev³✉

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

¹ nvihreva@gmail.com

² mikasya@yandex.ru

³ hash-93@mail.ru✉

Abstract. The article addresses the problem of selecting a station for the formation of technical routes under constraints of line capacity and station processing capacity within port-access railway corridors. Based on the functional capabilities of the Unified Data Model of the Transportation Process for Operational Management (UDM TP OM), a multicriteria model and an algorithm for the dynamic formation of technical routes to a single consignee

have been developed. The proposed approach relies on the integration of data on wagon-flow distribution, infrastructure constraints, and forecast train movement parameters, which makes it possible to select a route formation station with due regard to the current parameters of the transportation process. A formalization of the objective function is presented, incorporating the effects of reducing wagon turnaround time, increasing the level of routing, and changing operating costs. The model takes into account economic and technological factors related to section capacity, station processing capacity, the conditions for route formation toward port railway hubs, and the specific features of wagon-flow organization on the approaches to them. In addition, the influence of uneven wagon arrivals, the level of infrastructure utilization, and technological constraints of station operations on the choice of a rational routing option is considered. The operational and economic effects are assessed using the example of grain transportation to the port station of N under alternative options for selecting the route formation station. It is established that the application of the algorithm within the UDM TP OM framework ensures a transition from static planning to a dynamic decision-support mode, improves the stability of wagon delivery to port stations, contributes to the rationalization of wagon flows, reduces train reclassification at port hubs, and increases the efficiency of operational work under conditions of limited infrastructure capacity.

Keywords: Unified Data Model of the Transportation Process for Operational Management, technical route, car flow routing, port stations, dynamic planning, multi-criteria optimization, capacity

For citation: Kovaleva N. A., Mulenko O. Khashev V., A. I. Formation of technical routes in a dynamic transportation management environment. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(80):30–38. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_80_30.

Введение

Современные исследования в области управления железнодорожными перевозками в припортовых транспортно-технологических системах свидетельствуют о возрастающей роли цифровых платформ, обеспечивающих интеграцию данных, координацию работы подразделений и поддержку принятия решений в условиях инфраструктурных ограничений. В данной связи особую значимость приобретают научные подходы, ориентированные на цифровизацию управления вагонопотоками, маршрутизацию перевозок и повышение устойчивости работы припортовых станций.

В работе Е. А. Чеботаревой, Е. В. Рязановой, С. М. Наурузбаева рассмотрены цифровые и информационные технологии управления железнодорожными припортовыми транспортно-технологическими системами [1]. Авторами показано, что применение цифровых инструментов позволяет повысить согласованность планирования и исполнения перевозочного процесса, обеспечить более полную обработку данных и повысить адаптивность управления в сложных эксплуатационных условиях.

Проблематика повышения эффективности работы припортовых станций конкретизирована в исследовании В. Н. Зубкова и Н. Н. Мусиенко, посвященном анализу показателей и мер по их достижению на грузовой станции Н [2]. Авторы выявляют влияние неравномерности подвода вагонов, высокой загрузки инфраструктуры и задержек в обработке поездов на показатели работы станции. Выводы данного исследования подтверждают необходимость совершенствования механизмов маршрутизации вагонопотоков и разработки алгоритмов, позво-

ляющих снижать переработку составов в припортовых узлах. В этой части результаты работы [2] непосредственно соотносятся с задачей выбора рациональной станции формирования технического маршрута.

Существенный интерес для методологического обоснования исследования представляет работа Е. А. Чеботаревой, В. А. Богачева, Т. В. Богачева, в которой устойчивость решений автономных систем дифференциальных уравнений рассматривается применительно к управлению вагонопотоками в адрес припортовых железнодорожных станций [3]. Предложенный авторами подход ориентирован на анализ динамики транспортной системы и оценку устойчивости ее функционирования при изменении параметров входных потоков. Это особенно важно для разрабатываемой в статье модели, поскольку выбор станции формирования технического маршрута также осуществляется в условиях изменяющейся эксплуатационной обстановки и требует учета динамического характера перевозочного процесса.

В. М. Задорожний, В. А. Богачев, Т. В. Богачев, А. С. Кравец в работе [4] предлагают геометрическую маршрутизационную модель нахождения рациональных распределений порожних вагонопотоков в припортовой транспортно-технологической системе. Авторы исследуют задачу маршрутизации с позиций пространственной конфигурации сети и распределения потоков между элементами транспортной системы. Несмотря на то что работа ориентирована преимущественно на порожние вагонопотоки, ее результаты имеют методическую значимость и для настоящего исследования, так как демонстрируют возможность формализован-

ного выбора рациональных вариантов движения вагонов с учетом сетевых ограничений.

Отдельного внимания заслуживает работа [5] (авторы О. Н. Числов, В. А. Богачев, А. С. Кравец, Т. В. Богачев), посвященная временной параметризации в распределении грузопотоков транспортно-технологических систем. В исследовании определено, что временной фактор должен рассматриваться как один из ключевых параметров при оптимизации движения потоков, поскольку именно временные характеристики отражают реальную динамику функционирования транспортной системы. Для темы настоящего исследования это имеет принципиальное значение, так как в разрабатываемой модели одним из основных критериев выступает сокращение времени оборота вагонов.

Таким образом, анализ литературы показывает, что в существующих исследованиях достаточно полно раскрыты отдельные аспекты цифровизации управления перевозками, устойчивости транспортных систем, маршрутизации вагонопотоков и временной параметризации процессов [1–10]. Вместе с тем сохраняется потребность в комплексной модели, объединяющей инфраструктурные, временные и экономические параметры выбора станции формирования технического маршрута в едином цифровом контуре. В отличие от рассмотренных работ в настоящем исследовании предлагается многокритериальная модель и алгоритм выбора станции формирования маршрута, что позволяет перейти от локального анализа перевозочной ситуации к динамической поддержке управленческих решений.

Единая модель данных перевозочного процесса управления эксплуатационной работой (ЕМД ПП УЭР) используется как цифровая среда интеграции данных о вагонопотоках, инфраструктурных ограничениях и параметрах движения поездов, что позволяет реализовать динамический выбор станции формирования технического маршрута.

Цель исследования – разработка модели и алгоритма выбора станции формирования технического маршрута в динамической среде управления перевозочным процессом на базе ЕМД ПП УЭР с учетом инфраструктурных и эксплуатационных ограничений.

Материалы и методы исследования

Маршрутизация перевозок грузов и пассажирских вагонов является одной из форм организации вагонопотоков в поездах, способствует уменьшению объема переработки вагонов на сортировочных станциях, ускорению оборота вагонов, экономии материальных средств, повышению надежности и ритмичности доставки грузов, созданию условий обеспечения сохранности грузов при перевозках.

Формирование технических маршрутов в адрес одного грузополучателя является задачей многокритериальной оптимизации, направленной на достижение равновесия между пропускной способностью участков, перерабатывающей способностью станций и экономическими эффектами от повышения уровня маршрутизации.

В отличие от существующих подходов, где план формирования определяется статически (по плану Диспетчерского центра управления перевозками (ДЦУП) и действующим схемам маршрутизации), в системе ЕМД ПП УЭР этот процесс переводится в динамическую форму принятия решений, основанную на анализе состава вагонопотока, структуре инфраструктурных ограничений и прогнозных данных о движении поездов.

В основе модели лежит гипотеза: существует множество промежуточных станций, на которых возможно техническое формирование маршрутов в адрес одного грузополучателя, и выбор оптимальной станции определяется балансом транспортных, временных и инфраструктурных критериев.

Рассмотрим полигон железнодорожных направлений $G = (V, E)$, где $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ – множество станций, $E = \{e_{ij}\}$ – множество участков между станциями v_i и v_j .

Пусть S_o – станция отправления вагонопотока; S_d – припортовая станция назначения; $R \subset V$ – множество кандидатов на станции технического формирования маршрутов; Q_{ij} – объем вагонопотока, следующего от станции v_i к v_j ; T_{ij} – нормативное время следования между станциями v_i и v_j ; P_{ij} – пропускная способность участка e_{ij} ; C_{ij} – эксплуатационные затраты на перевозку одной условной группы вагонов по участку e_{ij} ; L_k – максимальная длина маршрута (в вагонах) на станции v_k ; M_k – перерабатывающая способность станции v_k ; G_p – грузополучатель, в адрес которого

направляется вагонопоток; F_k – функция инфраструктурной готовности станции v_k к техническому формированию маршрута.

Цель системы ЕМД ПП УЭР – выбрать такую станцию (или набор станций) $v_k \in R$, при которой совокупный эффект от формирования маршрута максимален. Математическая постановка оптимизации задачи может быть выражена следующим образом:

$$\max_{v_k \in R} E(v_k) = f_1(v_k) + \alpha_2 f_2(v_k) + \alpha_3 f_3(v_k), \quad (1)$$

где $f_1(v_k)$ – функция экономии времени оборота вагонов; $f_2(v_k)$ – функция повышения уровня маршрутизации; $f_3(v_k)$ – функция затрат на формирование маршрута; α_2, α_3 – весовые коэффициенты значимости.

Функция экономии времени оборота вагонов – сокращение времени оборота вагонов $\Delta T_{об}$ определяется как разность между временем оборота при существующей технологии и временем оборота при внедрении маршрута, сформированного на станции v_k :

$$f_1(v_k) = \sum_{p \in P_{G_p}} (T_{баз}(p) - T_{нов}(p, v_k)), \quad (2)$$

где P_{G_p} – множество вагонопотоков в адрес грузополучателя G_p .

Фактически, чем ближе к началу маршрута производится укрупнение потока, тем больше суммарное сокращение времени оборота.

Функцию повышения уровня маршрутизации – уровень маршрутизации U_m можно определить как отношение количества вагонов, прибывших маршрутом без переработки, к общему количеству вагонов, направленных в адрес G_p :

$$U_m(v_k) = \frac{N_{марш}(v_k)}{N_{общ}}, \quad (3)$$

где $N_{марш}(v_k)$ – количество вагонов, включенных в маршруты, сформированные на станции v_k .

Тогда функция $f_2(v_k) = U_m(v_k) - U_m^{баз}$, где $U_m^{баз}$ – исходный уровень маршрутизации на полигоне без использования подсистемы.

Функция затрат на формирование маршрута – это эксплуатационные затраты, которые включают:

- расходы на дополнительное маневровое формирование $C_{ман}$;
- оплату локомотивных операций $C_{лок}$;
- технологические издержки времени на перестановки $C_{пер}$.

$$f_3(v_k) = C_{ман}(v_k) + C_{лок}(v_k) + C_{пер}(v_k), \quad (4)$$

где каждая составляющая зависит от инфраструктурных характеристик станции v_k .

Таким образом, целевая функция записывается в нормированной форме:

$$\max_{v_k \in R} E(v_k) = w_1 \frac{f_1(v_k)}{\max f_1} + w_2 \frac{f_2(v_k)}{\max f_2} - w_3 \frac{f_3(v_k)}{\max f_3}, \quad (5)$$

где w_i – нормированные коэффициенты приоритетности (например: $w_1 = 0,4$; $w_2 = 0,4$; $w_3 = 0,2$).

Модель должна учитывать физические, технологические и инфраструктурные ограничения:

1. Пропускная способность участков – через каждый участок сети может быть пропущен только такой объем вагонопотока, который не превышает его фактическую пропускную способность, т. е. поток Q_{ij} не должен превышать пропускную способность P_{ij} для всех участков e_{ij} , принадлежащих множеству участков сети E : $Q_{ij} \leq P_{ij}, \forall e_{ij} \in E$.

2. Перерабатывающая способность станции формирования – это максимальное количество вагонов или поездов, которое станция способна принять, обработать и отправить за определенный период времени, без нарушения нормальных технологических параметров. То есть это верхняя граница производительности станции при существующих путях, стрелках, локомотивах и персонале: $N_{форм}(v_k) \leq M_k$.

3. Длина маршрута: $N_{ваг}(v_k) \leq L_k$.

4. Технологическая осуществимость формирования:

$$F_k = \begin{cases} 1, & \text{если на станции имеются пути, тяга и персонал,} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (6)$$

5. Неухудшение пропускной способности соседних участков: $\Delta P_{ij}(v_k) \geq 0$.

Создадим алгоритм расчета оптимальной станции формирования:

1. Сбор исходных данных: ЕМД ПП УЭР получает в реальном времени:

- заявки из электронной транспортной накладной (ЭТРАН): адрес грузополучателя, сроки, объемы;
- инфраструктурные параметры из Динамической модели загрузки инфраструктуры (ДМЗИ): загрузка, пропускная способность, ремонтные «окна»;
- данные о текущем движении из Автоматизированной системы оперативного управления перевозками (АСОУП-3).

2. Группировка вагонопотоков: потоки кластеризуются по признаку грузополучатель – станция назначения. Для каждой группы G_p вычисляется объем Q_{G_p} и маршрут следования.

3. Определение кандидатов: из множества V выбираются станции R , удовлетворяющие условиям: $M_k < M_{\min}$, $L_k < L_{\min}$, $F_k = 1$.

4. Расчет частных эффектов – для каждой станции $v_k \in R$:

- $f_1(v_k)$ – экономия времени оборота вагонов (по сравнению с базой);
- $f_2(v_k)$ – рост уровня маршрутизации;
- $f_3(v_k)$ – дополнительные затраты на маневровую работу.

5. Формирование функции предпочтения:

$$E(v_k) = w_1 \frac{f_1(v_k)}{\max f_1} + w_2 \frac{f_2(v_k)}{\max f_2} - w_3 \frac{f_3(v_k)}{\max f_3}. \quad (7)$$

6. Выбор оптимального решения:

$$v^* = \arg \max_{v_k \in R} E(v_k). \quad (8)$$

7. Формирование управленческого предложения для структурных подразделений: результат передается в виде ранжированного списка станций с оценкой эффекта.

8. Верификация и самообучение. После выполнения планов система получает фактические данные о задержках, переработке и маршрутизации, пересчитывает коэффициенты w_i и уточняет параметры модели.

Работа по обеспечению планов перевозок к припортовым станциям базируется на последовательности:

– Территориальный центр фирменного транспортного обслуживания (ТЦФТО) формирует заявки на перевозку по грузоотправителям и назначению (например, ст. Н, ЦСК);

– Центральная дирекция управления движением (ЦДУД) – филиал РЖД консолидирует план перевозок и формирует суточный план подвода по дорогам;

– ДЦУП и Дирекция управления движением (ДУД) распределяют вагонопотоки по полигонам и определяют станции возможного формирования технических маршрутов;

– станции формирования выполняют операции укрупнения составов с учетом готовности инфраструктуры и указаний ЕМД ПП УЭР;

– Северо-Кавказский отдел логистики перевозок и информационного анализа (СКАВ ЛП) контролирует выполнение графика и сравнивает фактические и плановые показате-

ли (время подачи, маршрутизацию, загрузку инфраструктуры);

– ДМ ЗИ обеспечивает контроль допустимой загрузки участков $Q_{ij} \leq P_{ij}$.

Таким образом, взаимодействие реализуется по принципу сквозного информационного контура, где данные формируются в ТЦФТО, проходят через ЕМД ПП УЭР и замыкаются в ДЦУП, обеспечивая единое планово-диспетчерское пространство.

Результаты исследования

На схеме представлены три исходных станции погрузки К1, К2, К3, объединяющиеся на узле ст. им. МГ. Далее осуществляется выбор станции формирования технического маршрута – ст. Л либо ст. Б, после чего груз следует на припортовую станцию Н к соответствующему получателю груза (г/п 1, г/п 2 и т. д.). Схема маршрутизации представлена на рисунке.

Модель отражает ключевые связи между подразделениями:

- информационные – через ЕМД ПП УЭР и СКАВ ЛП;
- технологические – между станциями формирования и припортовыми терминалами;
- аналитические – через ДМ ЗИ (контроль пропускной способности и переработки).

Функции системы ЕМД ПП УЭР в контуре взаимодействия. Подсистема выполняет несколько ключевых ролей:

1. Анализ суточного вагонопотока по грузополучателям и выявление возможностей маршрутизации.

2. Проверка пропускной способности участков сети и перерабатывающих мощностей станций ($Q_{ij} \leq P_{ij}$, $N_{\text{форм}} \leq M_k$).

3. Выбор оптимальной станции формирования маршрута по интегральной функции эффективности $v^* = \arg \max_{v_k \in R} E(v_k)$.

4. Передача решения в ДЦУП и станции для исполнения.

5. Мониторинг фактического выполнения через СКАВ ЛП и последующая корректировка алгоритма маршрутизации.

Таким образом, эффективное обеспечение планов перевозок к припортовым станциям возможно только при скоординированном взаимодействии всех структурных подразделений

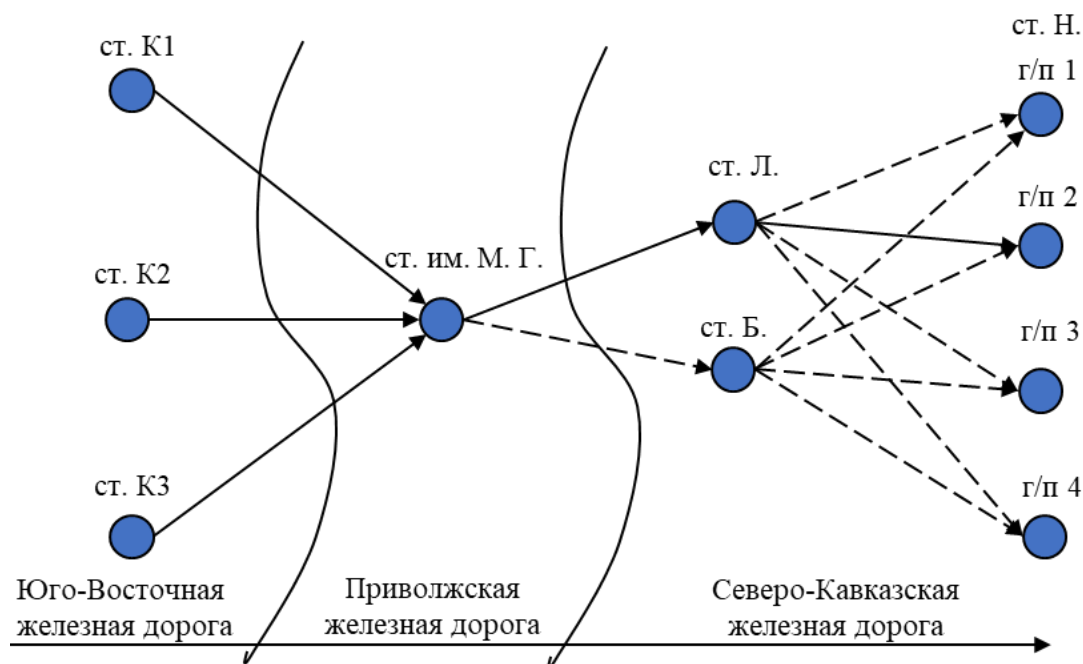


Схема формирования технических маршрутов зерновых перевозок с выбором станции v_k в системе

ОАО «РЖД». Интеграция ДЦУП, ТЦФТО, СКАВ ЛП и ДМ ЗИ в единую систему управления (ЕМД ПП УЭР) обеспечивает синхронизацию планирования и реального исполнения перевозок. Применение цифровой модели маршрутизации позволяет перевести взаимодействие подразделений в режим сквозного планирования – от заявки грузоотправителя до выгрузки на причале, обеспечивая устойчивое выполнение планов перевозок при ограниченной пропускной способности сети.

Анализируются эксплуатационные и экономические эффекты от формирования технического маршрута зерновых грузов в адрес станции Н (конкретный причал ЦСК) при двух альтернативах станции формирования:

- альтернатива А – ст. Л (формирование техмаршрута на подходах);
- альтернатива Б – ст. Б (формирование техмаршрута ближе к припортовой зоне).

Схема маршрутизации и логика подвода:

1. Погрузка: станции К1, К2, К3 (ЮВЖД).
2. Сквозной транзит через стык – станция Сах.

3. На ст. им. МГ (Приволжская железная дорога) выполняется технологическое укрупнение под Н (без окончательного техмаршрута).

4. Далее – выбор точки окончательного формирования технического маршрута: ст. Л или Б.

5. Назначение: ст. Н (г/п 1), выгрузка – без переработки состава.

Цель – показать, как математическая модель порождает измеримые эксплуатационные показатели и как они переводятся в экономический эффект для альтернатив А и Б.

Исходные данные (для расчета на один дополнительно маршрутизированный состав):

1. Номенклатура: зерно.
2. Количество составов: $n_{\text{сост}} = 1$ сост./сут.
3. Состав: $N_{\text{ваг}} = 70$ вагонов.
4. Маршрут назначения: ст. Н, причал г/п 1 (без переработки состава).
5. Альтернативы точки формирования технического маршрута: ст. Л / ст. Б.
6. Сокращение технологической переработки в припортовом узле на один поезд: $S_{\text{порт}} = 2,8$ ч/поезд.
7. Сокращение оборота по вагону (накопления/ожидания/маневры): $S_{\text{обр}} = 3,2$ ч/ваг.
8. Стоимость 1 ваг.-ч: $C_{\text{вч}} = 450$ р./ваг.-ч.
9. Маневровые затраты на формирование техмаршрута: на ст. Л составят $C_{\text{ман}} = 18,0$ тыс. р./сост.; на ст. Б $C_{\text{ман}} = 16,0$ тыс. р./сост.
10. Экономия энергии/топлива на один дополнительно маршрутизированный состав: $\delta_{\text{эн}} = 12,0$ тыс. р./сост.

Рассчитаем эксплуатационный эффект, который включает:

1. Снижение переработки в припортовой станции:

$$\Delta Q_{\text{пер}} = n_{\text{сост}} N_{\text{ваг}} = 1 \cdot 70 = 70 \text{ ваг./сут.}$$

2. Экономия вагоно-часов (на один состав):

$$H_{\text{ваг.-ч/сост}} = (S_{\text{порт}} + S_{\text{обр}}) N_{\text{ваг}} = (2,8 + 3,2) 70 = 420 \text{ ваг./ч.}$$

Эквивалент в вагоно-днях:

$$D_{\text{ваг/сост}} = H_{\text{ваг.-ч/сост}} / 24 = 420 / 24 = 17,5 \text{ ваг./сут.}$$

Экономические эффекты в расчете на одни сутки составят:

1. Монетизация экономии времени:

$$E_{\text{ваг.-ч/сут}} = H_{\text{ваг.-ч/сост}} C_{\text{вч}} = 420 \cdot 450 = 189,00 \text{ тыс. р./сут.}$$

2. Учет маневровых затрат

$$E_{\text{сут}} = E_{\text{ваг.-ч/сут}} - C_{\text{ман}}.$$

По альтернативам:

• ст. Л:

$$E_{\text{сут}} = 189,00 - 18,00 = 171,00 \text{ тыс. р./сут.}$$

• ст. Б:

$$E_{\text{сут}} = 189,00 - 16,00 = 173,00 \text{ тыс. р./сут.}$$

Примечание. При расчете на один состав разница между альтернативами идет только по $C_{\text{ман}}$, эксплуатационная экономия времени одинакова.

3. Годовой эффект, тыс. р./год, составит:

$$E_{\text{год}} = E_{\text{сут}} \cdot 365:$$

• ст. Л:

$$E_{\text{год}} = 171,00 \cdot 365 = 62,4 \text{ млн р./год.}$$

• ст. Б:

$$E_{\text{год}} = 173,00 \cdot 365 = 63,1 \text{ млн р./год.}$$

При учете лишь одного состава в сутки ст. Б дает немного больший чистый денежный эффект из-за меньших маневровых затрат.

В комплексных сценариях (когда формируется не один, а несколько дополнительных маршрутов в сутки) преимущество ст. Л часто возрастает за счет большего прироста уровня маршрутизации и разгрузки подходов – это отражено выше.

Для одного дополнительно маршрутизированного состава на причал ЦСК суточная экономия составляет 420 ваг.-ч (17,5 ваг.-сут) и ~171–173 тыс. р./сут чистого эффекта в зависимости от выбранной станции формирования; годовой эффект ~62–63 млн р. при ежедневном назначении одного состава.

Выводы

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Формирование технических маршрутов в адрес одного грузополучателя в условиях припортовых направлений является задачей многокритериальной оптимизации, требующей учета инфраструктурных, технологических и экономических ограничений.

2. Использование ЕМД ПП УЭР позволяет перевести процесс выбора станции формирования маршрута из статического режима в динамический, основанный на анализе текущего состояния вагонопотоков и инфраструктуры.

3. Разработанная модель и алгоритм обеспечивают выбор станции формирования на основе интегральной оценки, включающей сокращение времени оборота вагонов, повышение уровня маршрутизации и изменение эксплуатационных затрат.

4. Практическая апробация на примере зерновых перевозок в адрес припортовой станции Н показала, что применение предложенного подхода обеспечивает суточную экономию вагоно-часов.

5. Применение цифровой модели маршрутизации в контуре ЕМД ПП УЭР повышает устойчивость подвода вагонов к припортовым станциям и создает основу для дальнейшего развития интеллектуальных методов поддержки управленческих решений.

Список источников

1. Чеботарева Е. А., Рязанова Е. В., Наурузбаев С. М. Цифровые и информационные технологии управления железнодорожными припортовыми транспортно-технологическими системами // Мир транспорта и технологических машин. 2025. № 3-2 (90). С. 24–33. DOI 10.33979/2073-7432-2025-3-2(90)-24-33.
2. Зубков В. Н., Мусиенко Н. Н. Анализ показателей и меры по их выполнению на припортовой грузовой станции Новороссийск // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2024. № 1 (93). С. 66–78. DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_66.
3. Чеботарева Е. А., Богачев В. А., Богачев Т. В. Устойчивость решений автономных систем дифференциальных уравнений в изучении систем управления вагонопотоками в адрес припортовых железнодорожных станций // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 5 (72). С. 35–44. DOI 10.52170/1815-9265_2024_72_35.

4. Геометрическая маршрутизационная модель нахождения рациональных распределений порожних вагонопотоков в припортовой транспортно-технологической системе / В. М. Задорожный, В. А. Богачев, Т. В. Богачев, А. С. Кравец // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 2 (69). С. 63–70. DOI 10.52170/1815-9265_2024_69_63.
5. Временная параметризация в распределении грузопотоков транспортно-технологических систем / О. Н. Числов, В. А. Богачев, А. С. Кравец, Т. В. Богачев // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2019. № 3 (50). С. 14–22.
6. Козлов В. Г. Повышение эффективности технической маршрутизации на основе моделирования транспортного потока в железнодорожной сети // Экономика железных дорог. 2025. № 1. С. 50–59.
7. Методические подходы к организации перевозочного процесса на основе технико-технологических параметров / А. Ф. Бородин, В. В. Панин, Е. С. Максимова, Е. А. Лаханкин // Транспорт Урала. 2023. № 1 (76). С. 33–36. DOI 10.20291/1815-9400-2023-1-33-36.
8. Ковалева Н. А., Воронин Н. С., Хашев А. И. Развитие транспортно-технологических систем при организации контейнерных перевозок с применением современных технологий // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2023. № 2 (58). С. 119–127. DOI 10.20291/2079-0392-2023-2-119-127.
9. Марченко М. А., Покровская О. Д. Совершенствование технологии пропуска поездов при автоматизации диспетчерского управления // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11, № 3. С. 359–371. DOI 10.17816/transsyst689788.
10. Мамаев Э. А., Чеботарева Е. А. Математическая модель организации эксплуатационной работы в задачах повышения пропускной способности железнодорожного участка // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2025. Т. 22, № 1. С. 60–74. DOI 10.20295/1815-588X-2025-1-60-74.

References

1. Chebotareva E. A., Ryazanova E. V., Nauruzbaev S. M. Digital and information technologies for managing railway port transport and technological systems. *World of Transport and Technological Machines*. 2025;(90):24–33. (In Russ.). DOI 10.33979/2073-7432-2025-3-2(90)-24-33.
2. Zubkov V. N., Musienko N. N. Analysis of performance indicators and measures for their improvement at the Novorossiysk port freight station. *Bulletin of Rostov State Transport University*. 2024;(93):66–78. (In Russ.). DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_66.
3. Chebotareva E. A., Bogachev V. A., Bogachev T. V. Stability of solutions of autonomous systems of differential equations in the study of wagon flow control systems to port railway stations. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(72):35–44. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_72_35.
4. Zadorozhny V. M., Bogachev V. A., Bogachev T. V., Kravets A. S. Geometric routing model for determining rational distribution of empty wagon flows in a port transport and technological system. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(69):63–70. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_69_63.
5. Chislov O. N., Bogachev V. A., Kravets A. S., Bogachev T. V. Time parameterization in the distribution of freight flows in transport and technological systems. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2019;(50):14–22.
6. Kozlov V. G. Improving the efficiency of technical routing based on transport flow modeling in the railway network. *Economics of Railways*. 2025;(1):50–59. (In Russ.).
7. Borodin A. F., Panin V. V., Maksimova E. S., Lakhankin E. A. Methodological approaches to organizing the transportation process based on technical and technological parameters. *Transport of the Urals*. 2023;(76):33–36. (In Russ.). DOI 10.20291/1815-9400-2023-1-33-36.
8. Kovaleva N. A., Voronin N. S., Khashev A. I. Development of transport and technological systems in the organization of container transportation using modern technologies. *Bulletin of the Ural State University of Railway Transport*. 2023;(58):119–127. (In Russ.). DOI 10.20291/2079-0392-2023-2-119-127.
9. Marchenko M. A., Pokrovskaya O. D. Improvement of train passing technology under dispatcher control automation. *Innovative Transport Systems and Technologies*. 2025;11(3):359–371. (In Russ.). DOI 10.17816/transsyst689788.
10. Mamaev E. A., Chebotareva E. A. Mathematical model of operational work organization in problems of increasing railway section capacity. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2025;22(1):60–74. (In Russ.). DOI 10.20295/1815-588X-2025-1-60-74.

Информация об авторах

Н. А. Ковалева – кандидат технических наук, доцент кафедры «Логистика и управление транспортными системами» Ростовского государственного университета путей сообщения.

О. В. Муленко – кандидат технических наук, доцент кафедры «Логистика и управление транспортными системами» Ростовского государственного университета путей сообщения.

А. И. Хашев – кандидат технических наук, доцент кафедры «Логистика и управление транспортными системами» Ростовского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

N. A. Kovaleva – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Logistics and Management of Transport Systems Department, Rostov State Transport University.

O. V. Mulenko – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Logistics and Management of Transport Systems Department, Rostov State Transport University.

A. I. Khashev – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Logistics and Management of Transport Systems Department, Rostov State Transport University.

Статья поступила в редакцию 20.04.2026; одобрена после рецензирования 26.05.2026; принята к публикации 05.06.2026.

The article was submitted 20.04.2026; approved after reviewing 26.05.2026; accepted for publication 05.06.2026.

Научная статья
УДК 658.562.4+620.1.08
doi:10.52170/1815-9265_2026_80_39

Анализ работы автоматизированной системы измерения геометрических параметров пружин рессорного подвешивания

Дарья Ивановна Школина^{1✉}, Сергей Алексеевич Бехер²,
Артем Антонович Попков³, Владимир Сергеевич Выплавень⁴

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

¹ dashashkolina@mail.ru✉

² behers@mail.ru

³ zabagy@gmail.com

⁴ vladimir97927@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается автоматизированная система измерения геометрических параметров пружин рессорного подвешивания. Рессорное подвешивание является важным элементом ходовой части вагона, оно обеспечивает уменьшение динамических нагрузок на элементы вагона, плавность хода, в том числе на кривых участках пути, и уменьшает интенсивность нарастания износов во всех узлах и деталях вагонов. В нормативной документации установлены требования к высотам пружин, находящимся в одном комплекте, так как правильно сформированный комплект обеспечивает безопасную эксплуатацию подвижного состава. В настоящее время контроль геометрических параметров пружин рессорного подвешивания проводится с использованием ручных штатных средств, что требует значительных временных затрат. Для сокращения времени измерения и влияния человеческого фактора на результаты измерения и, следовательно, уменьшения погрешности необходима разработка специализированных систем, которые позволят в автоматическом режиме определять геометрические размеры и формировать комплекты для установки на вагон.

Цель исследования заключалась в анализе работы автоматизированной системы измерения геометрических параметров пружин рессорного подвешивания и подбора комплектов в соответствии с требованиями нормативной документации. Принцип действия установки основан на автоматической фотосъемке пружины на контрастном светящемся фоне с разных ракурсов и анализе полученных изображений специализированными алгоритмами. С использованием технологии технического зрения определяются геометрические параметры объекта в двух режимах работы: сплошной контроль пружин и формирование комплектов. Проанализированы результаты функционирования системы в вагонных ремонтных депо за один календарный год. Установлено, что время контроля одной пружины не превышает 5 с, а формирование комплекта занимает не более 3 мин без необходимости замены пружин.

Ключевые слова: система автоматизированного контроля, рессорное подвешивание, геометрические размеры, формирование комплектов, техническое зрение

Для цитирования: Анализ работы автоматизированной системы измерения геометрических параметров пружин рессорного подвешивания / Д. И. Школина С. А. Бехер А. А. Попков В. С. Выплавень // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 3 (80). С. 39–46. DOI 10.52170/1815-9265_2026_80_39.

Original article

Analysis of the operation of an automated system for measuring the geometric parameters of suspension spring coils

Darya I. Shkolina^{1✉}, Sergey A. Bekher², Artem A. Popkov³, Vladimir S. Vyplaveny⁴

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

¹ dashashkolina@mail.ru✉

² behers@mail.ru

³ zabagy@gmail.com

⁴ vladimir97927@gmail.com

Abstract. The article discusses an automated system for measuring geometric parameters of suspension spring coils. Spring suspension is an important element of the carriage undercarriage, it reduces the dynamic loads

on the carriage elements, ensures smooth running, including on curved sections of the track, and reduces the intensity of wear build-up in all nodes and parts of the wagons. The regulatory documentation establishes requirements for the heights of springs located in one set, since a properly formed set ensures the safe operation of rolling stock. Currently, the geometric parameters of the suspension spring coils are monitored using manual standard tools. Carrying out these measurements requires considerable time. In order to reduce the measurement time and the influence of the human factor on the measurement results, and therefore reduce the error, it is necessary to develop specialized systems that will automatically determine the geometric dimensions and form kits for installation on the car.

The purpose of the study was to analyze the operation of an automated system for measuring the geometric parameters of suspension spring coils and selecting kits in accordance with the requirements of regulatory documentation. The principle of the installation is based on the automatic photographing of the spring on a contrasting luminous background from different angles and the analysis of the resulting images by specialized algorithms. Using the technology of technical vision, the geometric parameters of the object are determined in two modes of operation: continuous control of springs and the formation of sets. The results of the system's operation in wagon repair depots for one calendar year are analyzed. It is established that the control time of one spring does not exceed 5 seconds, and the formation of a set takes no more than 3 minutes without the need to replace the springs.

Keywords: automated control system, spring suspension coil, geometric dimensions, formation of sets, technical vision

For citation: Shkolina D. I., Bekher S. A., Popkov A. A., Vyplaven V. S. Analysis of the operation of an automated system for measuring geometric parameters of suspension spring coils. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(80):39–46. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_80_39.

Введение

Вагонное хозяйство является важнейшим в железнодорожной отрасли и предназначено для перевозки грузов и пассажиров, а также содержания парка вагонов в исправном состоянии. Функционирование производственной базы вагонного хозяйства основывается на планово-предупредительной системе обслуживания и ремонта вагонов [1, 2]. Система определяет периодичность и вид ремонта для каждого типа вагона. Для грузовых вагонов предусмотрено несколько видов технического обслуживания, деповской и капитальный ремонт [3–5]. Деповской ремонт проводится в вагонных ремонтных депо после пробега 160 тыс. км. В случае внезапного отказа одного или нескольких элементов вагона выполняется текущий отцепочный ремонт.

Неисправности ходовых частей вагонов – наиболее распространенные причины отцепок грузовых вагонов в межремонтный период [6–8]. В отказах грузовых вагонов основное место занимают неисправности ходовой части, которая подвержена влиянию знакопеременных динамических нагрузок различной величины. В период с 2023 по 2025 г. 51 % грузовых вагонов отцеплены по причине неисправностей в деталях ходовой части (рис. 1, а), из них 71 % приходится на причины неисправностей элементов тележки вагона (см. рис. 1, б).

Ходовая часть вагона включает рессорное подвешивание, основная функция которого состоит в смягчении ударов и уменьшении амплитуды колебаний вагона при прохождении по неровностям пути между рамой вагона и колесной парой [9–13]. В качестве упругих

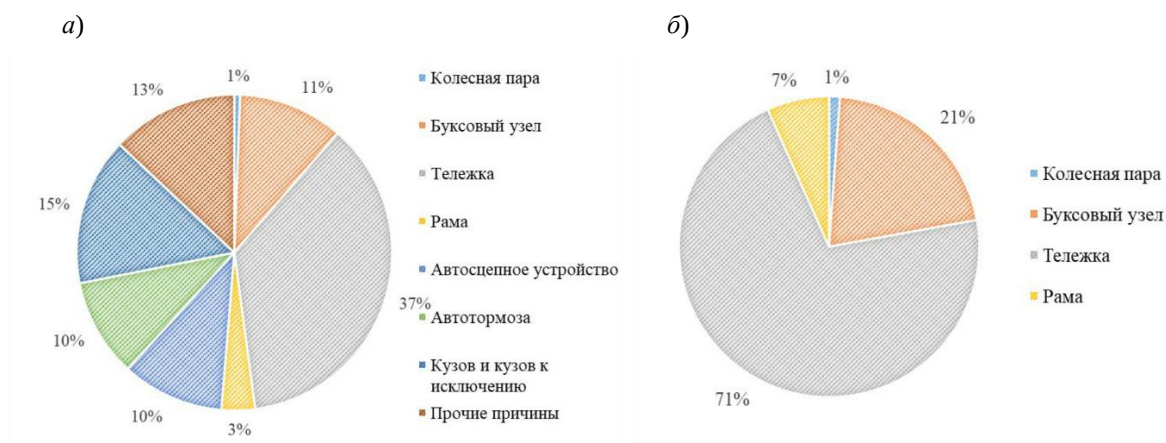


Рис. 1. Распределение отцепок вагонов за 2023–2025 гг.: а – по узлам; б – по дефектам в элементах ходовой части

элементов применяют винтовые пружины. Появление дефектов связано не только с условиями эксплуатации, но и с неправильным формированием комплекта рессорного подвешивания [14, 15]. Подбор комплекта рессорного подвешивания, осуществляемый для обеспечения нормальной эксплуатации вагонов и безопасности движения поездов, выполняется по геометрическим параметрам. Требованиями действующей нормативной документации жестко регламентированы диапазоны высот пружин, находящихся в одном комплекте, а также место каждой пружины, например у тележек модели 18-100 самые высокие пружины в комплекте устанавливаются под клин фрикционного гасителя колебаний.

В настоящее время контроль геометрических параметров пружин рессорного подвешивания проводится с использованием ручных штатных средств, как то: штангенциркуль, штангенглубиномер, калибр-стакан и калибр-пробка. Учитывая, что на одном вагоне может быть установлено до 56 пружин рессорного подвешивания, проведение измерений требует значительных временных затрат. Для уменьшения времени измерения и повышения точности результатов необходима разработка специализированных систем, которые позволят в автоматическом режиме определять геометрические размеры и формировать комплекты для установки на вагон.

Целью исследования является анализ работы автоматизированной системы измерения геометрических параметров пружин рессорного подвешивания и подбора комплектов в соответствии с требованиями нормативной документации.

Материалы и методы исследования

Для решения задачи измерения геометрических размеров пружин рессорного подвешивания грузовых вагонов разработана установка, принцип действия которой основан на автоматической фотосъемке пружины на контрастном светящемся фоне с разных ракурсов и анализе полученных изображений специализированными алгоритмами. С использованием технологии технического зрения определяются геометрические параметры объекта: высота пружины, внешний и внутренний диаметры, диаметр прутка, отклонение от перпендикулярности (рис. 2, а). Для определения параметров пружин используются пять камер (см. рис. 2, б). Три камеры для измерения высоты пружины, которые расположены на разных высотах, обеспечивают измерение широкого диапазона высот – от 233 до 294 мм. Одна камера служит для измерения наружного диаметра, еще одна – для определения диаметра прутка. Эти камеры используются для контроля отклонения от перпендикулярности оси пружины. По измеренным параметрам система может определять тип пружины и ее состояние: годен или брак.

Комплекс позволяет проводить контроль геометрических параметров пружин в нескольких режимах: контроль пружин, при котором измеряются все пружины подряд; контроль комплектов, при котором измеряется набор пружин в соответствии с выбранным типом тележки, после чего из проконтролированных пружин подбирается комплект, а также непрерывный контроль комплектов, при котором пружины измеряются последовательно, после контроля всех пружин будут сформированы комплекты (рис. 3). В случае



Рис. 2. Внешний вид (а) и устройство (б) автоматизированной системы измерения геометрических параметров пружин рессорного подвешивания

невозможности подбора комплекта из проконтролированных пружин система предложит поменять некоторые из них.

Результаты исследования

Согласно статистическим данным за три года, более 21 тыс. грузовых вагонов были отцеплены по неисправностям деталей и узлов тележек. В эксплуатации тележки подвержены нагрузкам, которые носят случайный характер и зависят от скорости движения, состояния железнодорожного пути и полезной нагрузки, вследствие чего возникают износы трущихся элементов и дефекты усталостного происхождения. Из общего количества неисправностей деталей тележки 60,7 % приходится на изломы пружин рессорного подвешивания (код дефекта 214, рис. 4, а), при этом в 2025 г. наблюдается увеличение количества

отцепок более чем в два раза по сравнению с 2023 и 2024 гг.

Рессорное подвешивание обеспечивает уменьшение динамических нагрузок на элементы вагона, плавность хода, а также интенсивности нарастания износов во всех узлах и деталях вагонов, на количество которых оказывает влияние формирование комплекта рессорного подвешивания. За рассматриваемый период в текущий отцепочный ремонт поступило 12,9 тыс. вагонов с неисправностью по коду 214 (излом пружин). Распределение количества отцепленных вагонов по излому пружин представлено на рис. 4, б. Среднее значение пробега грузового вагона до отцепки составляет 61,6 тыс. км.

В соответствии с требованиями ГОСТ 1452 циклическая долговечность пружин рессорного подвешивания должна обеспечивать

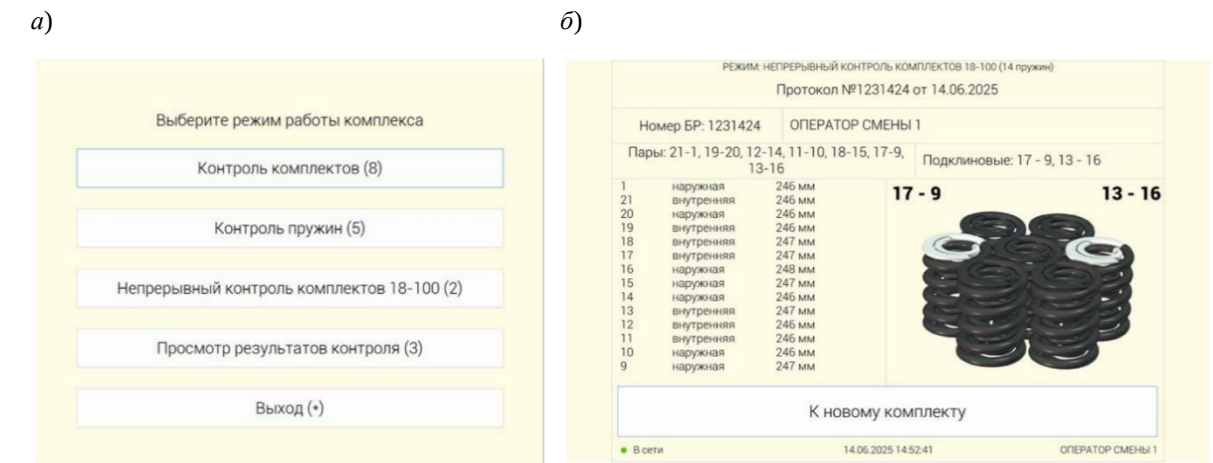


Рис. 3. Внешний вид программного обеспечения:
а – интерфейс выбора режима работы; б – интерфейс результата формирования комплекта

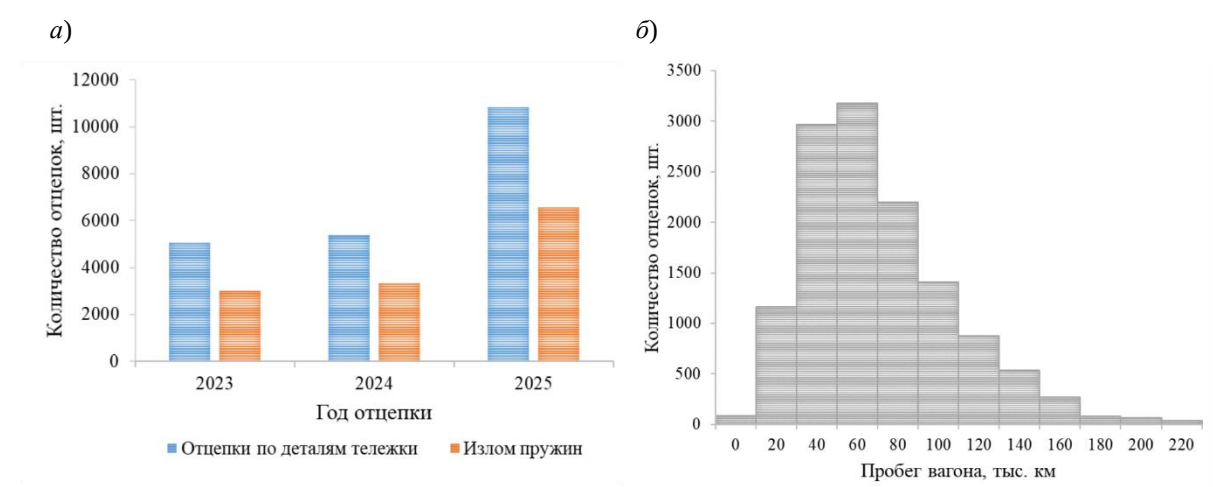


Рис. 4. Количество отцепленных вагонов по излому пружин (а) и распределение отцепленных вагонов по излому пружин в зависимости от пробега вагона (б)

срок их эксплуатации не менее 16 лет, однако у 96 % вагонов, поступивших в отцепочный ремонт, срок эксплуатации пружин не достигает даже следующего деповского ремонта, который производится спустя 160 тыс. км после проведения предыдущего вида ремонта.

Согласно накопленной статистике результатов измерений пружин за один календарный год в вагонных ремонтных депо проконтролировано более 500 тыс. пружин рессорного подвешивания, среднее количество забракованных составляет 12 %, из общего количества забракованных пружин 66,6 % приходится на несоответствия пружин по высоте, 24 % – на отклонения от перпендикулярности

оси пружины, 9,4 % – на прочие причины (рис. 5).

За рассматриваемый период сформировано 26 тыс. комплектов пружин рессорного подвешивания, среднее время контроля одной пружины не превышает 5 с, среднее время формирования комплекта при необходимости замены пружин – 4 мин (рис. 6), среднее время сборки одного комплекта без необходимости замены пружин – 3 мин.

Комплект рессорного подвешивания состоит из 14 пружин – семи внутренних и семи наружных. 7,7 тыс. комплектов сформировано без дополнительного измерения пружин, в 67 % формирования потребовалось измерение

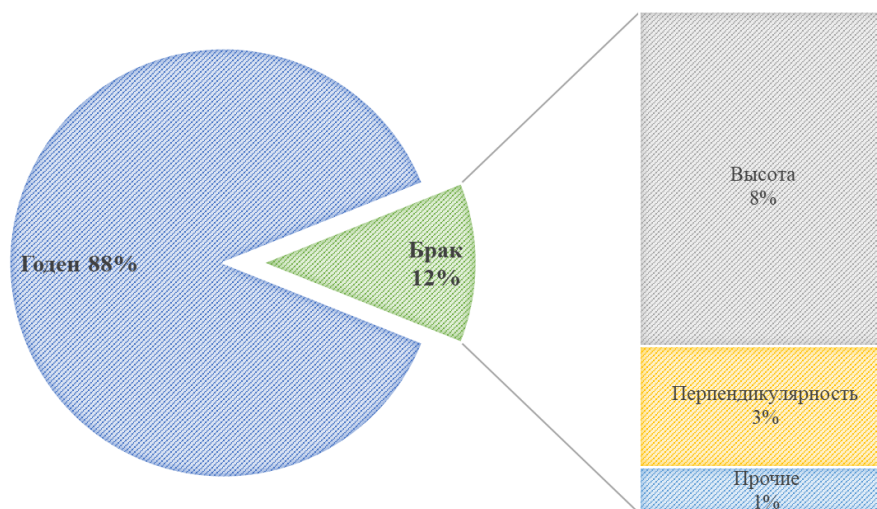


Рис. 5. Распределение результатов контроля пружин

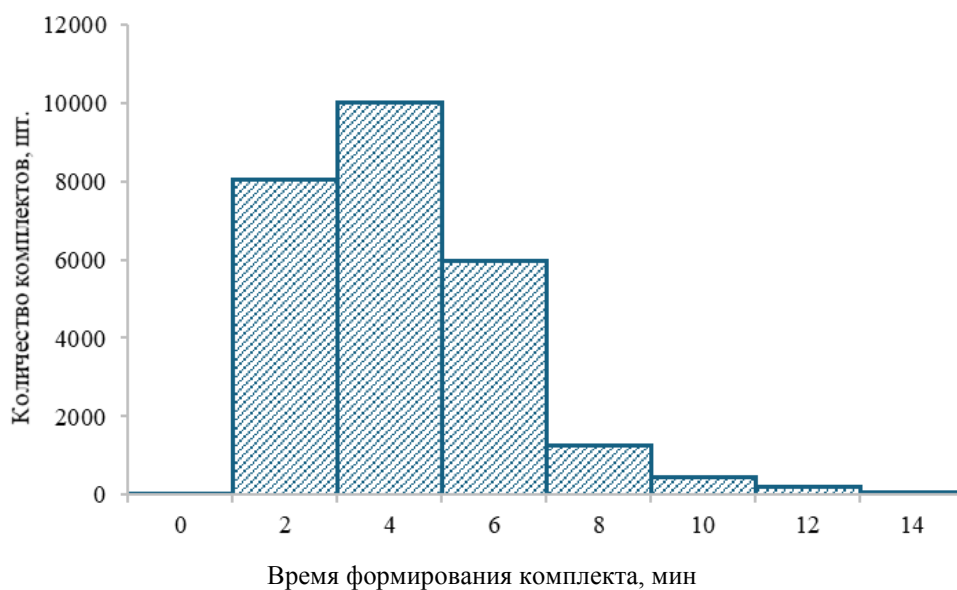


Рис. 6. Распределение времени формирования комплектов

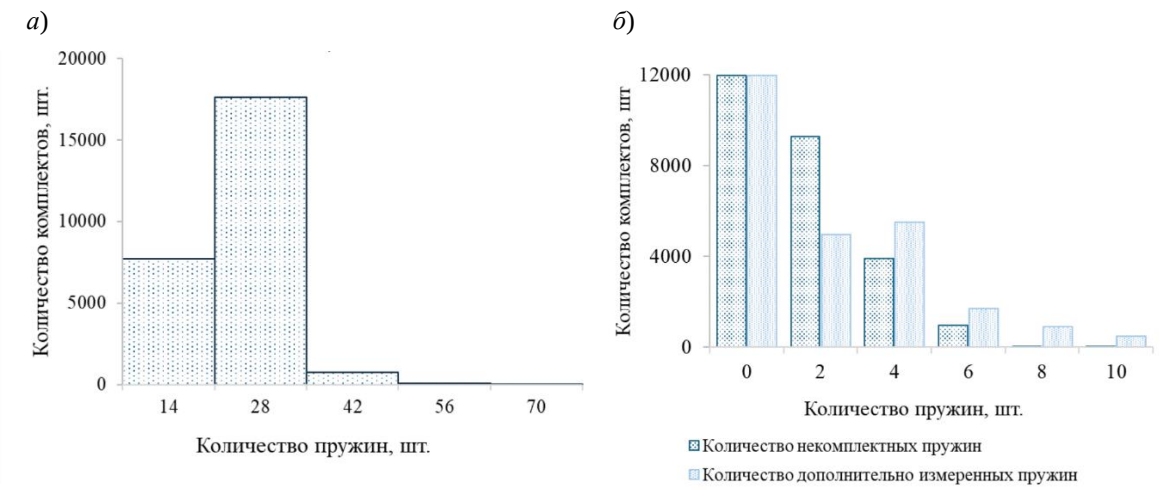


Рис. 7. Распределение измеренных для формирования одного комплекта пружин (а) и дополнительно измеренных пружин для формирования одного комплекта (б)

от 14 до 28 пружин для формирования одного комплекта (рис. 7, а). В 35 % случаев потребовалось измерение и замена двух пружин, однако всего в половине случаев удалось сформировать комплекты после измерения двух дополнительных пружин, в оставшихся случаях потребовалась от трех до четырех дополнительных измерений (см. рис. 7, б).

Выводы

Внедрение автоматизированной системы измерения геометрических параметров пружин рессорного подвешивания позволило уменьшить влияние человеческого фактора и сократить время контроля, а также осуществлять автоматизированный подбор комплектов в соответствии с нормативной документа-

цией. Создание базы данных с результатами контроля в дальнейшем предоставит возможность встроить комплекс в концепцию цифровизации технологических процессов на вагоноремонтных предприятиях.

При входном контроле бракуется 12 % всех пружин, в среднем одна пружина на комплект, в том числе по недопустимой высоте 66,6 %, по отклонению от перпендикулярности 24 %.

В среднем в одном комплекте требуется замена двух пружин. 45 % комплектов не требует ни одной замены пружины. При этом среднее время формирования одного комплекта составляет 4 мин, среднее время формирования одного комплекта без необходимости замены пружин – 3 мин.

Список источников

1. Сирина Н. Ф., Колодин А. Е. Функциональная архитектура цифровой модели технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов // Транспорт Урала. 2023. № 1 (76). С. 14–19. DOI 10.20291/1815-9400-2023-1-14-19.
2. Шинкарук А. С., Беспалько С. В. Оптимизация системы технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов // Транспортное машиностроение. 2024. № 11 (35). С. 64–70. DOI 10.30987/2782-5957-2024-11-64-70.
3. Смольянинов А. В., Кармацкий В. Ф., Волков Д. В. Анализ организационно-структурных преобразований вагоноремонтных предприятий // Инновационный транспорт. 2022. № 4 (46). С. 37–43. DOI 10.20291/2311-164X-2022-4-37-43. EDN WOUZEO.
4. Смольянинов А. В., Кармацкий В. Ф., Волков Д. В. Реформирование вагонного комплекса: итоги, проблемы, перспективы // Инновационный транспорт. 2021. № 4 (42). С. 57–61.
5. Смольянинов А. В., Кармацкий В. Ф., Соломенников А. А. Анализ текущего состояния, проблемы и перспективы вагоноремонтного производства в Уральском федеральном округе // Инновационный транспорт. 2020. № 4 (38). С. 37–43.

6. Черепов О. В., Лапшин В. Ф., Звягина М. А. Анализ отцепок вагонов для перевозки минеральных удобрений с осевой нагрузкой 25 тс в текущий ремонт // *Транспорт Урала*. 2024. № 1 (80). С. 18–23. DOI 10.20291/1815-9400-2024-1-18-23. EDN GYQVMD.
7. Рожкова Е. А. Оценка и прогнозирование технического состояния грузового вагона // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2021. № 5 (102). С. 40–47. DOI 10.30987/1999-8775-2021-5-40-47. EDN KDWYTC.
8. Шмойлов А. Н. Совершенствование технического обслуживания вагонов с применением автоматизированных систем теплового контроля букс // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2022. № 2. С. 617–620. DOI 10.24412/2071-6168-2022-2-617-621. EDN SBIVAJ.
9. Наговицын В. С., Буйносов А. П., Динисламов А. Р. Выбор и обоснование применения винтовых рессор для железнодорожного подвижного состава // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2019. № 2. С. 38–41. EDN YXGCAH.
10. Fatigue Crack Propagation of 51CrV4 Steels for Leaf Spring Suspensions of Railway Freight Wagons / Vítor M. G. Gomes, Grzegorz Lesiuk, José Correia, Abili Jesus // *Materials*. 2024. Vol. 17. P. 1831. DOI 10.3390/ma17081831.
11. Tursunov N., Absattarov S., Abdulazizovna M. D. Enhancing the mechanical and functional characteristics of structural spring steel through the advancement of heat treatment technologies // *Vibroengineering Procedia*. 2025. Vol. 58. P. 327–332. <https://doi.org/10.21595/vp.2025.24992>.
12. Absattarov S., Yunusov S., Tursunov N. Research of the stress-strain state and durability of freight wagon trolley springs by the method of finite element modeling in ANSYS // *Vibroengineering Procedia*. 2025. Vol. 60. P. 664–669. DOI 10.21595/vp.2025.25532.
13. Kuleshov A., Morozov D., Pykhalov A. Analysis of impact of static and dynamic loads on the structural elements of the rolling stock // *Spravochnik : Inzhenernyi zhurnal*. 2024. Vol. 4. P. 43–50. DOI 10.14489/hb.2024.04.
14. Балалаев А. Н., Жебанов А. В. Выявление на виртуальном испытательном стенде пружин рессорного подвешивания с недопустимыми в эксплуатации параметрами // *Транспорт Урала*. 2025. № 2 (85). С. 2936. DOI 10.20291/1815-9400-2025-2-29-36. EDN FMUGKL.
15. Бороненко Ю. П., Меркушев С. В. Причины излома пружин тележек типа 18-100 в эксплуатации // *Транспорт Российской Федерации*. 2021. № 4 (95). С. 41–43. EDN BLUTGQ.

References

1. Sirina N. F., Kolodin A. E. Functional architecture of digital model of maintenance and repair of freight cars. *Transport of the Urals*. 2023;(76):14–19. (In Russ.). DOI 10.20291/1815-9400-2023-1-14-19.
2. Shinkaruk A. S., Bepalko S. V. Optimization of maintenance and repair system of passenger cars. *Transport Engineering*. 2024;(35):64–70. (In Russ.). DOI 10.30987/2782-5957-2024-11-64-70.
3. Smolyaninov A. V., Karmatsky V. F., Volkov D. V. Analysis of organizational and structural transformations of railway car repair enterprises. *Innotrans*. 2022;(46):37–43. (In Russ.). DOI 10.20291/2311-164X-2022-4-37-43. EDN WOUEZO.
4. Smolyaninov A. V., Karmatsky V. F., Volkov D. V. Reforming the wagon complex: results, problems, prospects. *Innotrans*. 2021;(42):57–61. (In Russ.).
5. Smolyaninov A. V., Karmatsky V. F., Solomennikov A. A. Analysis of the current state, problems and prospects of car repair production in the Ural Federal District. *Innotrans*. 2020;(38):37–43. (In Russ.).
6. Cherepov O. V., Lapshin V. F., Zvyagina M. A. Analysis of uncoupling cars for the transportation of mineral fertilizers with an axle load of 25 ton-force for current repairs. *Transport of the Urals*. 2024;(80):18–23. (In Russ.). DOI 10.20291/1815-9400-2024-1-18-23. EDN GYQVMD.
7. Rozhkova E. A. Assessment and forecasting of freight car technical state. *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2021;(102):40–47. (In Russ.). DOI 10.30987/1999-8775-2021-5-40-47. EDN KDWYTC.
8. Shmoilov A. N. Improving the maintenance of wagons with the use of automated thermal control systems buks. *Izvestiya Tula State University*. 2022;(2):617–620. DOI 10.24412/2071-6168-2022-2-617-621. EDN SBIVAJ.
9. Nagovitsyn V. S., Buinosov A. P., Dinislamov A. R. Selection and justification of the use of helical springs for railway rolling stock. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*. 2019;(2):38–41. (In Russ.). EDN YXGCAH.
10. Gomes Vítor M. G., Lesiuk Grzegorz, Correia José, Jesus Abili. Fatigue Crack Propagation of 51CrV4 Steels for Leaf Spring Suspensions of Railway Freight Wagons. *Materials*. 2024;17:1831. DOI 10.3390/ma17081831.
11. Tursunov N., Absattarov S., Abdulazizovna M. D. Enhancing the mechanical and functional characteristics of structural spring steel through the advancement of heat treatment technologies. *Vibroengineering Procedia*. 2025;58:327–332. <https://doi.org/10.21595/vp.2025.24992>.

12. Absattarov S., Yunusov S., Tursunov N. Research of the stress-strain state and durability of freight wagon trolley springs by the method of finite element modeling in ANSYS. *Vibroengineering Procedia*. 2025;60:664–669. DOI 10.21595/vp.2025.25532.

13. Kuleshov A., Morozov D., Pykhalov A. Analysis of impact of static and dynamic loads on the structural elements of the rolling stock. *Spravochnik. Inzhenernyi Zhurnal*. 2024;4:43–50. DOI 10.14489/hb.2024.04.

14. Balalaev A. N., Zhebanov A. V. Identification of spring suspension springs with parameters unacceptable for operation on a virtual test bench. *Transport of the Urals*. 2025;(85):29–36. (In Russ.). DOI 10.20291/1815-9400-2025-2-29-36. EDN FMUGKL.

15. Boronenko Iu. P., Merkushev S. V. Causes of fracture of 18-100 type bogie springs in operation. *Transport of the Russian Federation*. 2021;(95):41–43. (In Russ.). EDN BLUTGQ.

Информация об авторах

Д. И. Школина – кандидат технических наук, руководитель НИГ «Лаборатория неразрушающего контроля и технической диагностики» НИЛ «Физические методы контроля качества» Сибирского государственного университета путей сообщения.

С. А. Бехер – доктор технических наук, заведующий НИЛ «Физические методы контроля качества» Сибирского государственного университета путей сообщения.

А. А. Попков – кандидат технических наук, руководитель НИГ «Интеллектуальные методы и средства управления техническими системами» НИЛ «Физические методы контроля качества» Сибирского государственного университета путей сообщения.

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

Information about the authors

D. I. Shkolina – Candidate of Engineering, Head of the Research Group, Physical Methods of Quality Control Research Laboratory, Siberian State University.

S. A. Bekher – Doctor of Engineering, Head of the Physical Methods of Quality Control Research Laboratory, Siberian State University.

A. A. Popkov – Candidate of Engineering, Head of the Research Group, Physical Methods of Quality Control Research Laboratory, Siberian State University.

V. S. Vyplavenny – Candidate of Engineering, Research Associate of the Physical Methods of Quality Control Research Laboratory, Siberian State University.

Статья поступила в редакцию 05.05.2026; одобрена после рецензирования 29.06.2026; принята к публикации 30.06.2026.

The article was submitted 05.05.2026; approved after reviewing 29.06.2026; accepted for publication 30.06.2026.

Научная статья
УДК 625.143.0+656.21.064.5
doi:10.52170/1815-9265_2026_80_47

Интеграция физической нагрузочной и статистической деградационной моделей при прогнозировании ресурса верхнего строения железнодорожного пути для новых условий эксплуатации

Александр Сергеевич Ададунов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург,
Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ), Москва, Россия,
vorudada@ya.ru

Аннотация. В современной практике управления ресурсом верхнего строения железнодорожного пути используются два принципиально различных подхода к прогнозированию: физическое моделирование с учетом проходов подвижного состава с дефектными колесными парами и статистическое моделирование деградации пути с горизонтом до 15 лет. Указанные подходы развивались независимо и не имели методической связи, что ограничивало возможности прогнозирования для новых условий эксплуатации, не имеющих накопленного массива данных о деградации.

В статье предложена методика двусторонней интеграции физической нагрузочной модели (микроуровень) и статистической деградационной модели Единой корпоративной автоматизированной системы мониторинга деградации инфраструктуры ОАО «РЖД» (макроуровень). Интеграция осуществляется в двух направлениях: снизу вверх – вычисление коэффициентов деградации из физических параметров коэффициента эквивалентности (повреждаемости ε -го элемента верхнего строения пути от прохода колесной пары с дефектом поверхности катания, который определяет аналогичное число проходов бездефектной колесной пары, создающее ту же повреждаемость данного элемента, и наблюдаемой доли дефектованных колесных пар); сверху вниз – уточнение физических параметров по накопленным данным диагностики эталонных участков.

Показано, что характеристическая длительность накопленных данных, при которой вклады физической и статистической моделей равноценны, составляет $(3,5 \pm 0,8)$ года: при меньших сроках накопления прогноз преимущественно физический, при больших – статистический. Апробация методики выполнена для четырех участков Восточного полигона ОАО «РЖД» с обращением грузовых поездов массой 14 200 т. Среднее расхождение гибридного прогноза с фактическими данными составило 8–12 %, что превосходит точность отдельных моделей (15–25 % у статистической, 12–18 % у физической без калибровки). Предложенный подход существенно расширяет применимость прогнозирования ресурса верхнего строения пути для условий, в которых накопленный массив данных диагностики ограничен или отсутствует.

Ключевые слова: верхнее строение пути, деградация, нагрузочная модель, переходная деградационная функция, гибридное прогнозирование, тяжеловесное движение, правило Пальмгрена – Майнера, байесовское взвешивание, дефекты поверхности катания

Для цитирования: Ададунов А. С. Интеграция физической нагрузочной и статистической деградационной моделей при прогнозировании ресурса верхнего строения железнодорожного пути для новых условий эксплуатации // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 3 (80). С. 47–54. DOI 10.52170/1815-9265_2026_80_47.

Original article

Integration of physical load and statistical degradation models in predicting the resource of the upper structure of the railway track for new operating conditions

Aleksandr S. Adadurov

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, Railway Research Institute
of JSC Russian Railways (VNIIZhT), Moscow, Russia, vorudada@ya.ru

Abstract. In the modern practice of managing the resource of the upper structure of the railway track, two fundamentally different approaches to forecasting are used: physical modeling, taking into account the passages of rolling stock with defective wheelsets, and statistical modeling of track degradation with a horizon of up to 15

years. These approaches were developed independently and did not have a methodological connection, which limited the possibilities of forecasting for new operating conditions that did not have an accumulated array of degradation data.

The article proposes a method of bilateral integration of the physical load model (micro-level) and the statistical degradation model of the Unified Corporate Automated System for Monitoring the Degradation of the Infrastructure of Russian Railways, UCASMD (macro-level). The integration is performed in two directions: bottom-up – calculation of the degradation function coefficient from the physical equivalence coefficient and the observed proportion of defective wheelsets – and top-down – refinement of physical parameters from accumulated diagnostic data of reference sections.

The inverse-variance weighting principle is applied to determine the optimal balance between the two models. It is shown that the characteristic duration of accumulated data at which the contributions of the physical and statistical models are equal is (3.5 ± 0.8) years: below this threshold the forecast is predominantly physical, above it – predominantly statistical. The method was validated on four sections of the Eastern polygon of Russian Railways carrying 14,200-tonne freight trains. The average deviation of the hybrid forecast from actual data was 8–12 %, which outperforms the accuracy of the individual models (15–25 % for the statistical model, 12–18 % for the physical model without calibration). The proposed approach substantially extends the applicability of upper track structure resource forecasting to conditions where accumulated diagnostic data are limited or unavailable.

Keywords: upper track structure, degradation, load model, transition degradation function, hybrid forecasting, wheel flat, Palmgren–Miner rule, Bayesian weighting, track surface defects

For citation: Adadurov A. S. Integration of physical load and statistical degradation models in predicting the resource of the upper structure of the railway track for new operating conditions. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(80):47–54. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_80_47.

Введение

Прогнозирование ресурса верхнего строения железнодорожного пути (ВСП) исторически развивалось в двух методически различных направлениях. Первое направление – физическое моделирование процессов взаимодействия колеса с рельсом и накопления повреждений в элементах пути, начатое М. Ф. Вериго, А. Я. Коганом, Н. Н. Кудрявцевым и продолженное современными исследователями [1, 2]. Второе направление – статистическое моделирование деградации ВСП на основе накопленного массива данных эксплуатации, реализованное в Единой корпоративной автоматизированной системе мониторинга деградации инфраструктуры (ЕК АСУИ СДМИ) и составившее научную основу деградационной модели ОАО «РЖД» 2025–2026 гг. [3, 4].

Физическое моделирование обеспечивает корректное описание механизма повреждения от единичного прохода дефектной колесной пары, включая эффект суперпозиции при множественных дефектах, влияние скорости движения, состояния балластного слоя и типа конструкции пути. Однако переход от единичного прохода к интегральному годовому ресурсу затруднен ввиду сложности учета всей совокупности проходящих по конкретному участку поездов. Статистическое моделирование, напротив, обеспечивает корректное описание интегрального ресурса на уровне перегона на горизонте до 15 лет, но требует наличия достаточного объема накопленных данных диагностики и теряет применимость при изменении условий эксплуата-

ции (введении новых типов подвижного состава, новых конструкций ВСП, новых режимов движения). В 2025 г. на сети ОАО «РЖД» началось регулярное обращение грузовых поездов массой 14 200 т на ряде участков Восточного полигона (Юрты – Иркутск, Слюдянка – Новоильинский, Петровский Завод – Хилок, Чита – Могоча, Уруша – Архара, Карымская – Хабаровск – Смоляниново). Для усиления конструкции ВСП на указанных направлениях применяются новые технические решения, в том числе рельсы Р71/Р75 с увеличенной на 10 % площадью поперечного сечения, шпалы III-ДБ с увеличенным на 40 % сопротивлением сдвигу, скрепления ЖБР-ПШТ и ЖБР-ШПР, подрельсовое полимерное покрытие ПШП. Для указанных условий эксплуатации отсутствует накопленный массив данных о деградации, что делает прямое применение статистической деградационной модели методически некорректным.

Таким образом, для решения задачи прогнозирования ресурса ВСП в новых условиях эксплуатации требуется развитие методической базы, обеспечивающей совместное использование физического и статистического подходов. Настоящая работа направлена на разработку такой методики двусторонней интеграции.

Материалы и методы исследования

Физическая нагрузочная модель оценки воздействия грузового подвижного состава на ВСП [5, 6] основана на разделении вагонопотока на бездефектную и дефектную составляющие и физически обоснованных коэффициентах эквивалентности для элементов ВСП. Ключевым

параметром модели является коэффициент эквивалентности $\eta_\varepsilon(h, V)$ повреждаемости ε -го элемента верхнего строения пути от прохода колесной пары с дефектом поверхности катания, который определяет аналогичное число проходов бездефектной колесной пары, создающее ту же повреждаемость данного элемента:

$$\eta_\varepsilon(h, V) = \left(\frac{Q_{\text{деф}}(h, V)}{Q_{\text{нор}}} \right)^{m_\varepsilon}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{деф}}(h, V)$ – пиковая сила удара колеса с дефектом глубины h при скорости V ; $Q_{\text{нор}}$ – статическая сила бездефектного колеса; m_ε – показатель нелинейности отклика ε -го элемента ВСП (из независимых физических теорий разрушения [7]: $m_p = 3$ для рельса, $m_{\text{ш}} = 2$ для шпал, $m_b = 2$ для подбалластного основания, $m_{\text{скр}} = 2,5$ для креплений).

В физической модели корректно описаны механизмы повреждения для любых сочетаний параметров (h, V) , включая новые конструкции и режимы. Но есть и методические ограничения. Это высокая чувствительность к точности эмпирических параметров и отсутствие стохастической природы накопления повреждений на интегральном уровне перегона. Дegradационная модель ВГДП ИСУЖТ ДМ опирается на накопленный массив данных систем КАС АНТ, КАСАТ, АСУ ВОП-3 и ЕК АСУИ СДМИ за 2015–2025 гг. и обеспечивает прогноз количества предупреждений об ограничениях скорости движения $N_{\text{огр}}(T)$ на горизонте до 15 лет как функцию пропущенного тоннажа T . Ядро модели составляют переходные деградационные функции вида

$$N_{\text{огр}}(T) = N_0 \exp\left(\frac{W_m T}{T_0}\right), \quad (2)$$

где N_0 – начальное (после планового ремонта) количество предупреждений; W_m – переходный деградационный коэффициент m -го целевого деградационного параметра; T_0 – характеристический тоннаж нормирования.

Экспоненциальная форма (2) обоснована условием постоянства интенсивности отказов в стационарных условиях эксплуатации (закон Маркова для систем с постоянной интенсивностью переходов между состояниями) и подтверждена эмпирически на участках сети с накопленным за длительный период массивом данных диагностики. Коэффициенты W_m определяются для четырех семейств деградационных параметров: количество предупреждений по причинам отступлений от норм геометрии рельсовой колеи (ГРК), количество остродефектных

рельсов (ОДР), количество отступлений по нормам выхода верхнего строения пути из исправного состояния, изменение загрязненности балластного слоя. Для участков сети с накопленным массивом данных длительностью пять и более лет коэффициенты W_m имеют статистически устойчивые значения и обеспечивают прогноз с точностью $\pm 25\%$ для 75 % перегонов при горизонте прогноза 15 лет.

Однако методические ограничения деградационной модели ВГДП ИСУЖТ ДМ, такие как неприменимость для условий без накопленного массива данных диагностики, невозможность объяснить причину деградации через физические механизмы взаимодействия дефектованного парка грузового подвижного состава с верхним строением пути, чувствительность к структурным изменениям парка обращающихся вагонов, определяют необходимость интеграции деградационной модели с физической нагрузочной моделью.

Несмотря на то что обе модели описывают один и тот же физический процесс – деградацию элементов ВСП под воздействием обращающегося подвижного состава, между ними отсутствует методическая связь, а преобразование между этими пространствами не выполнено ни в одной из известных публикаций по теме. Принципиальная схема двух подходов и их предлагаемого объединения представлена на рис. 1. Микроуровневая физическая нагрузочная модель использует данные систем стационарной диагностики (ПАУК – пост акустического универсального контроля, ППСС – интегрированный пост диагностики подвижного состава) [8] для декомпозиции вагонопотока на бездефектную и дефектную составляющие, расчета коэффициента эквивалентности η_ε для четырех элементов ВСП и формирования прогноза ресурса в форме силового эквивалента тоннажа (СЭТ). Макроуровневая статистическая деградационная модель опирается на накопленные данные систем КАС АНТ, АСУ ВОП-3 и СДМИ за период 2015–2025 гг., формирует переходные деградационные функции $N_{\text{огр}}(T)$ и позволяет спрогнозировать количество предупреждений об ограничениях скорости. Гибридная схема, представленная в настоящей работе, обеспечивает методическое объединение двух уровней через явные аналитические преобразования $\eta_\varepsilon \rightarrow W_m$ (снизу вверх – для условий без накопленного

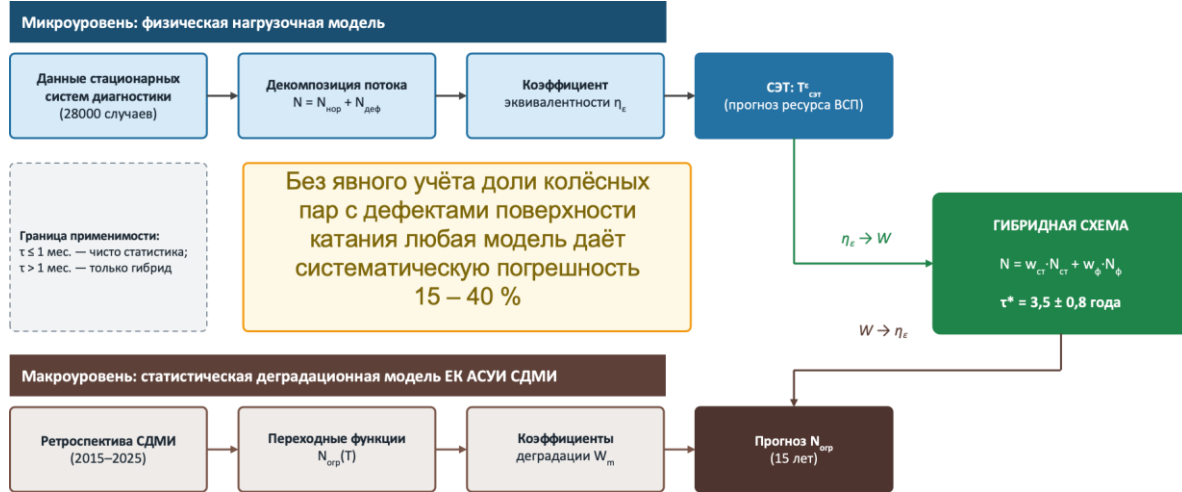


Рис. 1. Схема двусторонней интеграции физической нагрузочной модели и статистической деградационной модели

массива данных диагностики) и $W_m \rightarrow \eta_\epsilon$ (сверху вниз – для уточнения физических параметров по эталонным участкам).

Рассмотрим участок пути, через который за период t проходит $N(t)$ колесных пар, из них $N_{\text{деф}}(t)$ – дефектных, $N_{\text{нор}}(t)$ – бездефектных. Согласно правилу линейного накопления повреждений Пальмгрена – Майнера [9, 10], суммарная повреждаемость ϵ -го элемента ВСП от прохода N колесных пар выражается как сумма вкладов отдельных проходов:

$$D_\epsilon(t) = N_{\text{нор}}(t)d_{\text{нор}} + N_{\text{деф}}(t)d_{\text{деф}}, \quad (3)$$

где $d_{\text{нор}}$, $d_{\text{деф}}$ – повреждаемость ϵ -го элемента ВСП от одного прохода бездефектного и дефектного колеса соответственно.

По определению коэффициента эквивалентности [см. формулу (1)]

$$d_{\text{деф}} = \eta_\epsilon d_{\text{нор}}. \quad (4)$$

Подстановка (4) в (3) с учетом $\gamma = N_{\text{деф}}/N$ дает

$$D_\epsilon(t) = N(t)d_{\text{нор}}[(1 - \gamma) + \gamma\eta_\epsilon] = N(t)d_{\text{нор}}[1 + \gamma(\eta_\epsilon - 1)]. \quad (5)$$

Выражение (5) показывает, что эквивалентная интенсивность накопления повреждений в дефектном потоке отличается от интенсивности в бездефектном потоке множителем $[1 + \gamma(\eta_\epsilon - 1)]$. В физическом смысле этот множитель есть отношение фактической интенсивности деградации к интенсивности при бездефектном потоке.

Коэффициент W_m переходной деградационной функции (2) в физическом смысле прямо пропорционален интенсивности накопления повреждений в фактических условиях

эксплуатации. Поэтому соотношение (5) можно записать в виде

$$W_m^\epsilon(\gamma) = W_m^{\epsilon, \text{баз}}[1 + \gamma(\eta_\epsilon - 1)], \quad (6)$$

где $W_m^{\epsilon, \text{баз}}$ – базовое значение коэффициента деградации в условиях бездефектного потока (предел $\gamma \rightarrow 0$).

Формула (6) позволяет рассчитать коэффициент деградационной функции W_m для условий, в которых нет накопленных данных диагностики, исходя из физических параметров η_ϵ и наблюдаемой доли γ колесных пар с дефектами поверхности катания в обрабатываемом парке. Линейность формулы (6) по γ означает, что повышение доли дефектованного парка на 1 % приводит к увеличению скорости деградации на $(\eta_\epsilon - 1)/100$ раз.

Базовое значение $W_m^{\epsilon, \text{баз}}$ определяется из накопленного массива данных диагностики по эталонному направлению – участку с известной долей γ_0 колесных пар с дефектами поверхности катания и максимально полным объемом накопленных данных:

$$W_m^{\epsilon, \text{баз}} = \frac{W_m^{\epsilon, \text{факт}}(\text{эталон})}{1 + \gamma_0(\eta_\epsilon - 1)}. \quad (7)$$

В качестве эталонного направления для базовой калибровки в настоящей работе используется участок ПЧ-12 Кингисепп Октябрьской железной дороги, на котором доступен накопленный массив данных диагностики за период 2019–2025 гг. с фактическим значением $\gamma_0 = 1,9$ %. При наличии достаточного объема накопленного массива данных диагностики значения $W_m^{\epsilon, \text{факт}}$ по эталонному

участку являются более точной мерой фактической интенсивности деградации, чем расчетные значения по физической модели. Обращением соотношения (6) получаем выражение для уточненного значения η_ε :

$$\eta_{\varepsilon, \text{уточ}} = 1 + \left(\frac{w_m^{\varepsilon, \text{факт}}}{w_m^{\varepsilon, \text{баз}}} - 1 \right) / \gamma. \quad (8)$$

Уточненное значение $\eta_{\varepsilon, \text{уточ}}$ может затем применяться к новым условиям, для которых сохраняется физическая природа взаимодействия, но изменяются конкретные параметры эксплуатации. Это направление интеграции обеспечивает обратную связь физической модели с накопленным опытом эксплуатации.

Для произвольного перегона сети при наличии двух независимых оценок $\hat{N}_{\text{огр}}(T)$ (статистической) и $N_{\text{огр}}^\phi(T)$ (физической) гибридный прогноз вычисляется в виде линейной комбинации:

$$\hat{N}_{\text{огр}}(T) = w_{\text{ст}} N_{\text{огр}}^{\text{ст}}(T) + w_\phi N_{\text{огр}}^\phi(T), \quad (9)$$

где $w_{\text{ст}} + w_\phi = 1$; $w_{\text{ст}}, w_\phi \geq 0$.

Согласно теории оценивания оптимальное взвешивание двух несмещенных независимых оценок осуществляется по принципу обратной дисперсии [11, 12]:

$$w_{\text{ст}} = \frac{1}{\sigma_{\text{ст}}^2} / \left(\frac{1}{\sigma_{\text{ст}}^2} + \frac{1}{\sigma_\phi^2} \right), \quad (10)$$

где $\sigma_{\text{ст}}^2$ – дисперсия статистической оценки; σ_ϕ^2 – дисперсия физической оценки.

После алгебраических преобразований

$$w_{\text{ст}} = \sigma_\phi^2 / (\sigma_{\text{ст}}^2 + \sigma_\phi^2). \quad (11)$$

Дисперсия физической модели σ_ϕ^2 определяется погрешностью оценки параметров (m_ε , η_ε , $k_{\text{суп}}$, γ) и не зависит от длительности наблюдений. Из анализа источников погрешностей [5, 6]:

$$\sigma_\phi^2 = \sigma_m^2 + \sigma_\eta^2 + \sigma_k^2 + \sigma_\gamma^2. \quad (12)$$

Предполагается, что указанные составляющие погрешности статистически независимы, поэтому суммарная дисперсия физической модели представляется в виде суммы частных дисперсий.

По центральной предельной теореме [13] при усреднении временного ряда наблюдений из τ лет дисперсия среднего убывает обратно пропорционально объему выборки:

$$\sigma_{\text{ст}}^2(\tau) = \frac{\sigma_0^2}{\tau}, \quad (13)$$

где σ_0^2 – дисперсия годовых наблюдений (характеристика «шума» в годовых рядах деградации); по эмпирическим данным ЕК АСУИ СДМИ за период 2015–2025 гг. для четырех семейств деградационных параметров (ГРК,

ОДР, ВСП, балласт) среднее значение $\sigma_0^2 = 0,087 \pm 0,019$.

Характеристическая длительность накопленных наблюдений τ^* определяется условием равенства дисперсий физической и статистической моделей:

$$\sigma_{\text{ст}}^2(\tau^*) = \sigma_\phi^2. \quad (14)$$

Из (13) и (14) непосредственно следует

$$\tau^* = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_\phi^2}. \quad (15)$$

Численная подстановка при $\sigma_0^2 = 0,087$ и $\sigma_\phi^2 = 0,025$ дает $\tau^* = 3,48$ лет. С учетом разброса оценок σ_0^2 и σ_ϕ^2 получаем

$$\tau^* = (3,5 \pm 0,8).$$

При длительности накопленных данных $\tau < \tau^*$ физическая модель точнее статистической и веса физического прогноза доминируют. При длительности накопленных данных $\tau > \tau^*$ статистическая модель точнее физической и веса статистического прогноза доминируют. Граница перехода – приблизительно 3,5 года накопленного массива данных диагностики. Графически условие равенства дисперсий (14) представлено на рис. 2.

Подстановка (13) в (11) с использованием $\tau^* = \sigma_0^2 / \sigma_\phi^2$ дает компактное окончательное выражение для весов гибридного прогноза:

$$w_{\text{ст}} = \frac{\tau}{\tau + \tau^*}, \quad w_\phi = \frac{\tau^*}{\tau + \tau^*}. \quad (16)$$

При $\tau < 1$ года вес статистической модели менее 22 % и прогноз преимущественно физический. При $\tau > 7$ лет вес статистической модели более 67 % и прогноз преимущественно статистический.

Это дает практический инструмент для изменения стратегии прогнозирования в зависимости от объема доступного накопленного массива данных диагностики (табл. 1).

Апробация методики выполнена для четырех участков Восточного полигона ОАО «РЖД», на которых с 2025 г. реализуется обращение грузовых поездов массой 14 200 т на новых типах конструкции ВСП. Характеристики участков представлены в табл. 2.

На примере участка Юрты – Иркутск гибридная схема, согласно (16), дает вес статистической модели $w_{\text{ст}} = 7 / (7 + 3,5) = 0,67$. Расчетный прогноз среднегодового количества предупреждений на интервале прогноза 5 лет составляет (142 ± 18) шт./(перегон·год), что эквивалентно суммарно (710 ± 90) предупреждений за пятилетний интервал. Фактическое

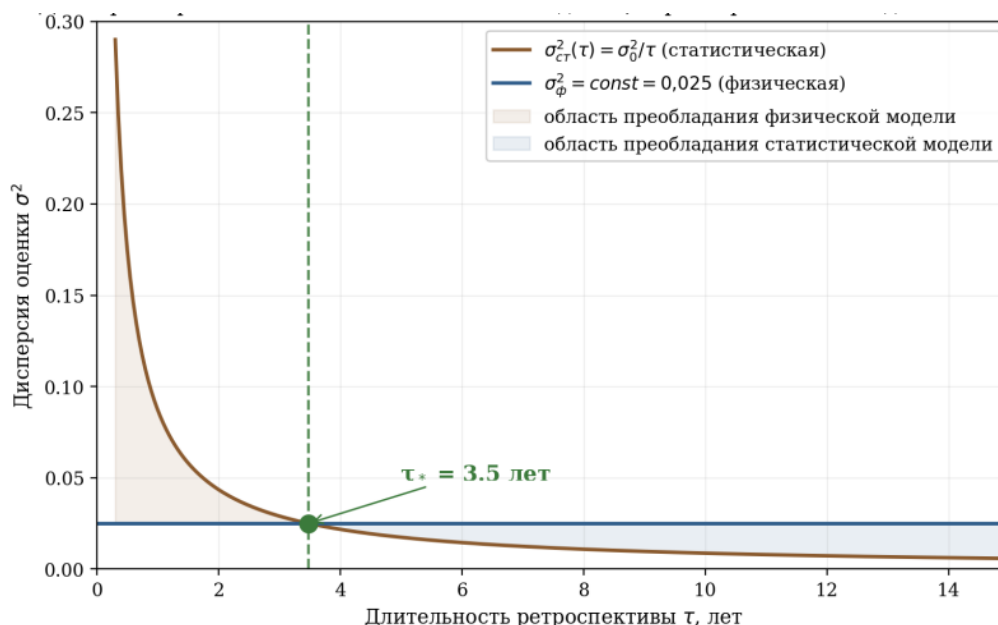


Рис. 2. Зависимость дисперсий статистической $\sigma_{\text{ст}}^2(\tau) = \sigma_0^2/\tau$ и физической $\sigma_{\text{ф}}^2 = \text{const}$ оценок от длительности накопленных наблюдений τ (точка пересечения определяет характеристическую длительность $\tau^* = 3,5$ года)

Таблица 1

Веса гибридного прогноза в зависимости от длительности накопленных наблюдений

τ , лет	$\sigma_{\text{ст}}^2(\tau)$	$w_{\text{ст}}$	$w_{\text{ф}}$	Стратегия
0 (новая конструкция)	∞	0	1,00	Только физика
1	0,087	0,22	0,78	Преим. физика
3,5	0,025	0,50	0,50	Равноценно
7	0,012	0,67	0,33	Преим. статистика
15 (макс.)	0,006	0,81	0,19	Только статистика

Таблица 2

Характеристики расчетных участков Восточного полигона

Участок	Дорога	Длина, км	Конструкция ВСП	Доля 14 200 т, %	γ парка, %
Юрты – Иркутск	ВСИБ	298	P65/КБ-65	8	2,1
Слюдянка – Новоильинский	ВСИБ	167	P65/ЖБР-65Ш	8	2,1
Чита – Могоча	ЗАБ	712	P71/Ш-ДБ	12	2,4
Уруша – Архара	ЗАБ	564	P71/ЖБР-ПШГ	12	2,7

значение в 2025 г. – 138 шт./((перегон·год), расхождение 2,9 %. Сводное сопоставление гибридного прогноза с фактическими данными за 2019–2025 гг. по семи перегонам Восточного полигона (Юрты – Иркутск, Слюдянка – Новоильинский, Зима – Алзатай, Тулун – Тайшет, Шилка – Чернышевск, Сковородино – Магдагачи, Архара – Облучье) с подтвержденными накопленными данными диагностики дает среднее расхождение прогноза и факта в пределах 8–12 %, что лучше точности отдельных моделей (15–25 % – у статистической, 12–18 % – у физической при отсутствии калибровки). Примене-

ние чисто статистического подхода к прогнозированию деградации пути методологически некорректно для долгосрочных горизонтов, поскольку в текущей реализации ЕК АСУИ СДМИ статистическая модель не содержит γ в числе явных параметров и при изменении структуры дефектованного парка относительно эталонного участка дает систематическое смещение оценки коэффициента деградации W_m .

Принципиальная разница между тоннажным критерием (действующая нормативная база) и нагрузочным критерием на основе СЭТ показана на рис. 3. Тоннажный критерий оценивает ресурс

	Тоннажный критерий	Нагрузочный критерий (СЭТ)
Формула:	$D = T(t) / T_{\text{норм}}$	$D = N \cdot \int f(Q) \cdot W(Q) dQ$
Учёт колёс с ДПК:	Нет	Прямой через спектр Q_{max}
Зависимость от Q:	Линейная	Степенная: Q^3 (рельсы), Q^2 (балласт)
Учёт сезонности:	Нет	$K_{\text{зим}} = 1,7$ (зимний коэф.)
Учёт скорости:	Косвенный (через тоннаж)	Прямой через $Q(V)$
Источники:	Распоряжения 2499р, 2243р	Коган 1986, Краснов 2022

Рис. 3. Принципиальная разница между тоннажным критерием оценки ресурса верхнего строения пути (без учета колес с ДПК) и нагрузочным (с явным учетом)

пропорционально пропущенному брутто-тоннажу и не учитывает фактическое техническое состояние колесных пар обращающегося парка. Нагрузочный критерий через спектр Q_{max} и коэффициенты эквивалентности $\eta_{\text{е}}$ для четырех элементов ВСП обеспечивают учет колес с дефектами поверхности катания и сезонных режимов балластного слоя. Указанный принципиальный недостаток тоннажного критерия не устраняется ни увеличением статистической базы, ни усложнением структуры статистической модели, поскольку имеет физическую природу.

Выводы

Достоверность любой модели прогнозирования ресурса верхнего строения железнодорожного пути критически зависит от учета технического состояния колесных пар обращающегося грузового подвижного состава. Модели, не учитывающие данный фактор, в том числе чисто статистические деградационные модели, основанные исключительно на накопленных данных пропущенного тоннажа, допускают систематическую погрешность прогноза в диапазоне

15–40 % в зависимости от длительности накопленных данных и фактической доли дефектованного парка. Указанная погрешность не устраняется ни увеличением статистической базы, ни усложнением структуры модели, поскольку имеет физическую природу. Для долгосрочного прогнозирования ресурса ВСП (горизонт свыше года) статистическая составляющая может применяться только в составе гибридной схемы с учетом данных от воздействия дефектных колес через коэффициент эквивалентности $\eta_{\text{е}}$. Самостоятельное применение чисто статистической модели методологически оправдано лишь в задачах краткосрочного оперативного мониторинга геометрии рельсовой колеи. Гибридная схема прогнозирования обеспечивает корректное использование всей доступной информации: как накопленных данных диагностики (где они имеются), так и физико-механистической (для новых условий). Указанный подход существенно расширяет применимость прогнозирования ресурса ВСП в реальных условиях перевозочного процесса на сети ОАО «РЖД» [14, 15].

Список источников

1. Коган А. Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом. Москва : Транспорт, 1997. 326 с.
2. Вериги М. Ф., Коган А. Я. Взаимодействие пути и подвижного состава. Москва : Транспорт, 1986. 559 с.
3. Программная реализация расчетных алгоритмов методики прогноза деградации пути : материалы научно-технического совета. Москва : ВНИИЖТ, 2026. 28 с.
4. Долгий А. И., Виноградов С. А. Концептуальная модель интегрированной платформы стратегического планирования и управления инфраструктурой ОАО «РЖД». Москва : НИИАС, 2026. 84 с.
5. Романов А. В., Киселев А. А. К вопросу о законе распределения динамической силы воздействия колеса на рельс // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2025. Т. 22, № 4. С. 926–937.
6. Результаты моделирования воздействия колеса грузового вагона с двумя ползунами небраковочного размера на железнодорожный путь / А. С. Адауров, П. И. Цомаев, И. М. Подгребенный, А. Н. Иванов // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. 2026. Т. 23, вып. 2. С. 40–48.
7. Краснов О. Г. Прогнозирование износа и контактно-усталостной повреждаемости рельсов для условий интенсификации грузового движения : специальность 2.9.2 «Железнодорожный путь, изыскание, проектирование

железных дорог» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Краснов Олег Геннадьевич ; Российский университет транспорта. Москва : РУТ (МИИТ), 2022. 312 с.

8. Ададунов А. С., Суслов О. А. Экспериментальные исследования цифровых акселерометров и систем обнаружения дефектов поверхности катания колес подвижного состава на их основе // *Техника железных дорог*. 2019. № 3 (47). С. 40–45.

9. Достигнутый результат внедрения поста акселерометрического универсального контроля и дальнейшие перспективы при определении дефектов на поверхности катания колес вагонов / А. С. Ададунов, В. И. Федорова, А. В. Нерезков, О. А. Суслов // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2021. № 1 (69). С. 192–199.

10. Miner M. A. Cumulative damage in fatigue // *Journal of Applied Mechanics*. 1945. Vol. 12. P. A159–A164.

11. Hartung J., Knapp G., Sinha B. K. *Statistical Meta-Analysis with Applications*. Hoboken, NJ : Wiley, 2008. 264 p.

12. Bernardo J. M., Smith A. F. M. *Bayesian Theory*. Chichester : Wiley, 2000. 586 p.

13. Cramér H. *Mathematical Methods of Statistics*. Princeton, NJ : Princeton University Press, 1946. 575 p.

14. Итоги производственно-хозяйственной деятельности путевого хозяйства за 12 месяцев 2025 года. Основные задачи на 2026 год : доклад Управления пути и сооружений ЦДИ ОАО «РЖД». Москва, 2026. 12 с.

15. Распоряжение ОАО «РЖД» от 18.08.2023 № 766/р. Стратегия развития Центральной дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД». Москва : РЖД, 2023. 53 с.

References

1. Kogan A. Ya. Track dynamics and its interaction with rolling stock. Moscow: Transport; 1997. 326 p. (In Russ.).
2. Verigo M. F., Kogan A. Ya. Interaction of track and rolling stock. Moscow: Transport; 1986. 559 p. (In Russ.).
3. Software implementation of the calculation algorithms for the track degradation forecasting method. *Proceedings of the Scientific and Technical Council*. Moscow: VNIIZhT; 2026. 28 p. (In Russ.).
4. Dolgy A. I., Vinogradov S. A. Conceptual model of the integrated platform for strategic planning and infrastructure management of Russian Railways. Moscow: NIAS; 2026. 84 p. (In Russ.).
5. Romanov A. V., Kiselev A. A. On the distribution law of the dynamic wheel-rail contact force. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2025;22(4):926–937. (In Russ.).
6. Adadurov A. S., Tsomayev P. I., Podgrebenny I. M., Ivanov A. N. Results of modelling the impact of a freight car wheel with two sub-rejection wheel flats on the railway track. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2026;23(2):40–48. (In Russ.).
7. Krasnov O. G. Prediction of rail wear and contact-fatigue damage under intensified freight traffic conditions. Specialty 2.9.2 ‘Railway Track, Railway Surveying and Design’: dissertation for the degree of Doctor of Engineering; Russian University of Transport. Moscow: RUT (MIIT); 2022. (In Russ.).
8. Adadurov A. S., Suslov O. A. Experimental study of digital accelerometers and systems for detecting wheel tread defects of rolling stock. *Railway Engineering*. 2019;(47):40–45. (In Russ.).
9. Adadurov A. S., Fedorova V. I., Nerezkov A. V., Suslov O. A. Implementation results of the accelerometric universal monitoring post and further prospects for detecting wheel tread defects of railway cars. *Modern Technologies. System Analysis. Modelling*. 2021;(69):192–199. (In Russ.).
10. Miner M. A. Cumulative damage in fatigue. *Journal of Applied Mechanics*. 1945;12:A159–A164.
11. Hartung J., Knapp G., Sinha B. K. *Statistical Meta-Analysis with Applications*. Hoboken, NJ: Wiley; 2008. 264 p. (Ch. 3 “Weighted estimators and inverse-variance weighting”).
12. Bernardo J. M., Smith A. F. M. *Bayesian Theory*. Chichester: Wiley; 2000. 586 p.
13. Cramér H. *Mathematical Methods of Statistics*. Princeton, NJ: Princeton University Press; 1946. 575 p. (Central limit theorem, Ch. 17).
14. Results of track maintenance operations for 12 Months of 2025. Key objectives for 2026: Report of the Track and Structures Department, Central Infrastructure Directorate of Russian Railways. Moscow; 2026. 12 p. (In Russ.).
15. Order No. 766/r of Russian Railways, dated 18.08.2023. Development strategy of the Central Infrastructure Directorate of Russian Railways. Moscow: Russian Railways; 2023. 53 p. (In Russ.).

Информация об авторе

А. С. Ададунов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, заместитель директора НИАЦ АО «ВНИИЖТ».

Information about the author

A. S. Adadurov – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Carriages and Carriage Maintenance Department of the St. Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I, Deputy Director of the NIAZ of JSC ‘VNIIZhT’.

Статья поступила в редакцию 25.05.2026; одобрена после рецензирования 24.06.2026; принята к публикации 25.06.2026.

The article was submitted 25.05.2026; approved after reviewing 24.06.2026; accepted for publication 25.06.2026.

Научная статья
УДК 625.173
doi:10.52170/1815-9265_2026_80_55

Анализ динамики роста эксплуатационных отказов металлокомпозитных стыков в условиях Транссибирской и Среднесибирской магистралей

Екатерина Александровна Мамеева¹, Дмитрий Валерьевич Величко^{2✉},
Владимир Васильевич Щербаков³

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

¹ mckatka09@mail.ru

² vdv.nsk@mail.ru✉

³ vvs@stu.ru

Аннотация. В статье представлена оценка динамики роста отказов изолирующих металлокомпозитных стыков (МКС) в эксплуатационных условиях Транссибирской и Среднесибирской магистралей в пределах Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры. Проведен анализ динамики роста отказов изолирующих стыков на примере дистанций З, К и Кар Среднесибирской магистрали и дистанций Т, Б, Ч и Ка Транссибирской магистрали по I и II путям. В анализе участвовало 24 опытных участка по I пути, 9 опытных участков по II пути на Среднесибирской магистрали и 26 опытных участков по I пути, 19 опытных участков по II пути на Транссибирской магистрали. Данные, необходимые для проведения анализа, взяты из годовых отчетов по бесстыковому пути (за период 2020...2024 гг.).

Получены зависимости изменения доли отказов изолирующих стыков МКС от пропущенного тоннажа (0...1 200 млн т) в особо грузонапряженных условиях железных дорог Сибири, в пределах Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры.

Определены средние значения доли отказов изолирующих стыков МКС нарастающим итогом по Среднесибирской и Транссибирской магистралям. Рассчитана интенсивность изменения доли отказов изолирующих стыков МКС от интервала пропущенного тоннажа, которая составила по Транссибирской магистрали: для I пути – 6,7 % на 100 млн т и для II пути – 5,9 % на 100 млн т; по Среднесибирской магистрали: для I пути – 5 % на 100 млн т и для II пути – 1,5 % на 100 млн т.

Проведена сравнительная оценка уровней и интенсивностей отказов металлокомпозитных стыков по I и II путям Среднесибирской и Транссибирской магистралей.

Ключевые слова: железнодорожный путь, металлокомпозитный стык, изостык, МКС, отказ, пропущенный тоннаж, срок службы

Для цитирования: Мамеева Е. А., Величко Д. В., Щербаков В. В. Анализ динамики роста эксплуатационных отказов металлокомпозитных стыков в условиях Транссибирской и Среднесибирской магистралей // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 3 (80). С. 55–65. DOI 10.52170/1815-9265_2026_80_55.

Original article

Analysis of the growth dynamics of operational failures of metal composite joints in the conditions of the Trans-Siberian and Central Siberian Railways

Ekaterina A. Mameeva¹, Dmitry V. Velichko^{2✉}, Vladimir V. Shcherbakov³

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

¹ mckatka09@mail.ru

² vdv.nsk@mail.ru✉

³ vvs@stu.ru

Abstract. The article presents an assessment of the growth dynamics of failures of insulating metal-composite joints (MCJ) in the operational conditions of the Trans-Siberian and Central Siberian Railways within the West Siberian Directorate of Infrastructure. The analysis of the growth dynamics of failures of insulating joints was carried

out on the example of the Z, K, and Kar distances of the Central Siberian Railway and the T, B, Ch, and Ka distances of the Trans-Siberian Railway on the I and II tracks. The analysis included 24 experimental sections on track I, 9 experimental sections on track II on the Central Siberian Railway, and 26 experimental sections on track I and 19 experimental sections on track II on the Trans-Siberian Railway. The data required for the analysis was taken from the annual reports on the continuous track (in the period 2020...2024).

The changes in the failure rate of the insulating joints of the continuous track were obtained as a function of the tonnage passed (0...1 200 million tons) in the particularly heavy-duty conditions of the Siberian railways, within the West Siberian Directorate of Infrastructure.

The average values of the share of failures of insulating joints were determined on a cumulative basis for the Central Siberian and Trans-Siberian Railways. The intensity of change in the share of failures of insulating joints from the interval of carried tonnage was calculated, which amounted to: for the Trans-Siberian Railway: for track 1 – 6.7% per 100 million tons and for track 2 – 5.9% per 100 million tons; for the Central Siberian Railway: for track 1 – 5% per 100 million tons and for track 2 – 1.5% per 100 million tons.

The average values of the failure rate of the insulating joints of the continuous track were determined.

Keywords: railway track, metal composite joint, insulated joint, MKS, failure, missed tonnage, service life

For citation: Mameeva E. A., Velichko D. V., Shcherbakov V. V. Analysis of the growth dynamics of perational failures of metal composite joints in the conditions of the Trans-Siberian and Central Siberian Railways. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(80):55–65. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_80_55.

Введение

Изолирующие металлокомпозитные стыки (МКС) на железнодорожных путях представляют собой конструкции, предназначенные для обеспечения электрической изоляции и соединения рельсовых цепей [1, 2]. Эти стыки используются, чтобы предотвратить прохождение электрического тока между блок-участками, что особенно важно в системах с электрической тягой и сигнализацией.

Металлокомпозитные материалы обладают хорошими механическими свойствами, которые помогают уменьшить нагрузку на стыки и повышают общий срок службы рельсов [3, 4]. Однако с увеличением пропущенного тоннажа возрастает эксплуатационное воздействие на изолирующие стыки, что может привести к их ускоренному износу и отказам [5–8].

В связи с этим актуальной является оценка влияния роста срока службы (пропущенного тоннажа) [9–11] на рост отказов МКС в современных эксплуатационных условиях, в том числе на примере участков Среднесибирской (Средсиб) и Транссибирской (Транссиб) магистралей в пределах Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры (ЗСДИ). Значимость данного вопроса возросла еще и в связи с тем, что важнейшей задачей, поставленной ОАО «РЖД» перед путевым комплексом, является дальнейшее повышение срока службы всей конструкции железнодорожного пути до 2,5 млрд т.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являются отказы МКС на семи дистанциях пути (З, К, Кар, Ч, Б, Т, Ка). Всего было выделено на Среднесибирской магистрали – 24 опытных участка по I

пути (555,8 км), 9 участков по II пути (27 км) и на Транссибирской магистрали – 26 участков по I пути (640,1 км), 19 участков по II пути (413,5 км).

По I и II пути главного направления дистанции пути Среднесибирской магистрали относятся к I классу, код группы ОШ, группа ГП; дистанции пути Транссибирской магистрали – к I классу, код группы ОШ. Средний интервал грузонапряженности по Транссибирской магистрали: 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. Средний интервал грузонапряженности по Среднесибирской магистрали: 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. Максимальная скорость движения пассажирских поездов на дистанциях пути Среднесибирской и Транссибирской магистралей составляет 100...120 км/ч, грузовых поездов – 80...90 км/ч.

Количество изолирующих стыков на каждом опытном участке и протяженность участков приведены в табл. 1 для Среднесибирской магистрали по I и II путям, в табл. 2 – для Транссибирской магистрали по I и II путям.

Данные, необходимые для анализа отказов изолирующих стыков в условиях Среднесибирской магистрали, взяты из годовых отчетов по бесстыковому пути З, К и Кар дистанций пути, в условиях Транссибирской магистрали – из годовых отчетов по бесстыковому пути Т, Б, Ч и Ка дистанций пути (за период 2020...2025 гг.).

Фрагмент данных о параметрах отказов изолирующих стыков для участков Среднесибирской и Транссибирской магистралей приведен в табл. 3.

Таблица 1

Характеристика опытных участков Средсиба

Дистанция пути (ПЧ)	Номер участка	Протяженность участка, км	Количество изостыков, шт.
<i>I путь</i>			
З	1.1 Укл – Шп	27,4	32
	1.2.1.1 Шп – Бат	23,3	28
	1.1.1 Бат – Зар	8,0	12
	1.4 Зар – Сма	24,8	26
	1.5 Сма – Гол	15,6	20
	1.6 Гол – Тяг	23,2	28
	1.6.1.1 Гол – Тяг	22,6	30
	1.7 Тяг – Ал	19,7	26
	1.7.1.1 Тяг – Ал	20,6	30
	1.8 Ал – Арт	22,5	36
Кар	1.2 Кар – Чеб	10,6	26
	1.3 Чеб – Зуб	30,7	42
	1.1 Чеб – Зуб	30,7	42
	1.4 Зуб – Кра	36,8	42
К	1.1 Зуб – Кра	25,3	28
	1.2 Хаб – Урыв	9,3	12
	1.3 Урыв – Пан	30,0	26
	1.1 Урыв – Пан	30,0	26
	1.4 Пан – Све	22,8	26
	1.5.1 Све – Кам	41,4	46
	1.6 Кам – Тар	33,7	40
	1.7 Рям – Лар	14,8	18
	1.8 Лар – Мол	21,7	26
	1.9 Мол – Сред	10,3	12
<i>II путь</i>			
З	2.2.1 Шп – Бат	23,7	28
	2.1 Бат – Зар	9,0	26
	2.7.1 Тяг – Ал	20,5	30
	2.8.1 Ал – Арт	22,4	30
Кар	2.1.1 Рай – Осо	34,7	44
	2.1 Чеб – Зуб	29,5	38
	2.4.1 Зуб – Кра	36,8	42
К	2.1.1 Зуб – Кра	25,3	26
	2.5.1 Све – Кам	41,4	46

При обработке материалов об отказах МКС использовались статистические методы с определением зависимости роста суммы отказов от роста пропущенного тоннажа, а также интенсивности изменения доли отказов МКС от интервала пропущенного тоннажа через каждые 100 млн т, что связано с большим числом опытных участков, имеющих разный уровень начальной наработки тоннажа.

Результаты исследования

Графики зависимости доли отказов изостыков нарастающим итогом от пропущенного тоннажа для участков Среднесибирской магистрали представлены на рис. 1, для участков Транссибирской магистрали – на рис. 2.

На рис. 1 и 2 видно, что на всех участках I и II пути первые отказы изолирующих стыков приходятся на разные значения пропущенного тоннажа и лишь у небольшого количества опытных участков – на значения до 200 млн т; это связано с недостаточным количеством данных за более ранние годы эксплуатации. Следовательно, необходимо оценить среднюю динамику роста доли отказов изолирующих стыков в зависимости от пропущенного тоннажа на участках Среднесибирской и Транссибирской магистралей.

С учетом данных, представленных на рис. 1 и 2, на которых имеет место неполное наслаивание результатов (графиков отказов от срока службы по участкам одного пути), предлагается методика определения средней поинтервальной интенсивности отказов: для каждого участка

Таблица 2

Характеристика опытных участков Транссиба

ПЧ	Номер участка	Протяженность участка, км	Количество изостыков, шт.
<i>I путь</i>			
Т	1.1 Тат – Каб	25,4	40
	1.2 Каб – Чан	24,5	32
	1.2.1.1 Каб – Чан	24,5	32
	1.3 Чан – Кар	14,5	30
	1.4 Кар – Теб	34,2	48
	1.5 Теб – Кир	30,7	42
	1.6 Кир – Бар	9,2	12
Б	1.1 Бар – Кир	13,0	22
	1.2 Тру – Бар	25,5	58
	1.3 Кож – Тру	32,3	48
	1.4 Уби – Кож	20,9	32
	1.5 Кар – Уби	50,0	58
Ч	1.1 Кар – Кок	21,2	32
	1.2.1 Кок – Чул	23,2	46
	1.3 Чул – Дуп	41,1	52
	1.1 Чул – Дуп	41,1	52
	1.4.1 Дуп – Коч	39,8	52
	1.5 Коч – Чик	15,2	30
	1.1.1 Сыр – Мос	18,5	24
Ка	1.2.1 Кор – Сыр	12,8	18
	1.3 Кал – Кор	28,9	40
	1.4 Вал – Кал	13,5	24
	1.4.1 Вал – Кал	13,5	24
	1.5.1 Кол – Вал	25,1	34
	1.6.1 Кал – Кор	22,8	28
	1.7 Тат – Кар	18,7	24
<i>II путь</i>			
Т	2.1.1 Тат – Каб	30,0	30
	2.2.1 Каб – Чан	25,0	32
	2.1 Чан – Кар	12,8	26
	2.4.1 Каб – Теб	33,1	42
	2.5.1 Теб – Кир	30,1	42
	2.6.1 Кир – Бар	9,6	16
	2.1.1 Кир – Бар	13,9	24
Б	2.2.1 Бар – Тру	23,5	42
	2.1 Тру – Кож	16,5	24
	2.5.1 Уби – Кар	41,4	60
	2.2.1 Кок – Чул	23,5	42
Ч	2.3 Чул – Дуп	40,7	48
	2.4.1 Дуп – Коч	35,1	36
	2.6.1 Чик – Обь	3,0	8
	2.1.1 Мос – Сыр	18,5	26
Ка	2.2.1 Сыр – Кор	12,5	20
	2.4 Кал – Вал	13,4	24
	2.4.1 Кал – Вал	13,4	24
	2.7.1 Кар – Тат	17,5	22

следует зафиксировать значения доли отказов изостыков на каждый интервал (100 млн т пропущенного тоннажа), чтобы более наглядно проследить рост доли отказов изолирующих стыков на каждые последующие 100 млн т, получив средние значения интенсивности изменения доли отказов изостыков отдельно по I и II пути.

На каждом из рис. 1 и 2 отдельно демонстрируется динамика отказов МКС по различным участкам (перегонам) в единых эксплуатационных условиях (грузонапряженность, скорость, осевая нагрузка, небольшая доля кривых, отсутствие кривых малого радиуса), основным явным отличием является срок

Таблица 3

Пример данных о параметрах отказов МКС по I пути

ПЧ	Номер участка	Год укладки	Пропущенный тон- наж, млн т	Количество отказов МКС, шт.	Всего МКС на участке, шт.	Доля отказов МКС, %	Доля отказов МКС нарастающим ито- гом, %	Длина участка, км	Выход МКС, шт./км	Выход МКС нарас- тающим итогом, шт./км
Средсиб										
3	1.1 Укл – Шп	2016	203	1	32	3,13	3,13	27,4	0,04	0,04
		2017	404	1	32	3,13	6,25	27,4	0,04	0,07
		2016	414	2	32	6,25	12,50	27,4	0,07	0,15
		2017	531	1	32	3,13	15,63	27,4	0,04	0,18
		2016	536	1	32	3,13	18,75	27,4	0,04	0,22
		2017	654	1	32	3,13	21,88	27,4	0,04	0,26
	1.2.1.1 Шп – Бат	2021	50	1	28	3,57	3,57	23,3	0,04	0,04
		2021	272	1	28	3,57	7,14	23,3	0,04	0,09
		2021	282	1	28	3,57	10,71	23,3	0,04	0,13
		2021	293	1	28	3,57	14,29	23,3	0,04	0,17
		2021	306	1	28	3,57	17,86	23,3	0,04	0,21
Транссиб										
Т	1.1 Тат – Каб	2014	172	4	40	10,00	10,00	25,4	0,16	0,16
		2014	280	3	40	7,50	17,50	25,4	0,12	0,28
		2014	401	1	40	2,50	20,00	25,4	0,04	0,31
		2014	402	3	40	7,50	27,50	25,4	0,12	0,43
		2014	487	6	40	15,00	42,50	25,4	0,24	0,67
		2014	531	3	40	7,50	50,00	25,4	0,12	0,79
		2014	535	1	40	2,50	52,5	25,4	0,04	0,83
Т	1.2 Каб – Чан	2011	264	1	32	3,13	3,13	24,5	0,04	0,04
		2011	287	1	32	3,13	6,25	24,5	0,04	0,08
		2011	380	3	32	9,38	15,63	24,5	0,12	0,20
		2011	487	1	32	3,13	18,75	24,5	0,04	0,24
		2011	495	2	32	6,25	25,00	24,5	0,08	0,33
		2011	603	1	32	3,13	28,13	24,5	0,04	0,37
		2011	724	1	32	3,13	31,25	24,5	0,04	0,41
		2011	725	3	32	9,38	40,63	24,5	0,12	0,53
		2011	752	1	32	3,13	43,75	24,5	0,04	0,57
		2011	850	2	32	6,25	50,00	24,5	0,08	0,65
		2011	853	2	32	6,25	56,25	24,5	0,08	0,73
		2011	854	3	32	9,38	65,63	24,5	0,12	0,86
		2011	855	2	32	6,25	71,88	24,5	0,08	0,94
		2011	920	1	32	3,13	75,00	24,5	0,04	0,98
		2011	950	2	32	6,25	81,25	24,5	0,08	1,06

службы (пропущенный тоннаж), влияние которого и оценивается в статье. Имеющие место различия в динамике отказов по отдельным участкам одного и того же пути могут быть связаны с отдельными локальными особенностями (отступления по ГРК пути, условия торможения), а также с отличиями качества текущего содержания пути разными путевыми бригадами.

Интенсивность изменения доли отказов изолирующих стыков для отдельных участков Среднесибирской магистрали представлена в табл. 4 и 5, Транссибирской магистрали – в табл. 6 и 7.

На рис. 3 показаны зависимости между интенсивностью изменения доли отказов изолирующих стыков нарастающим итогом и пропущенным тоннажем для I и II путей Среднесибирской и Транссибирской магистралей.

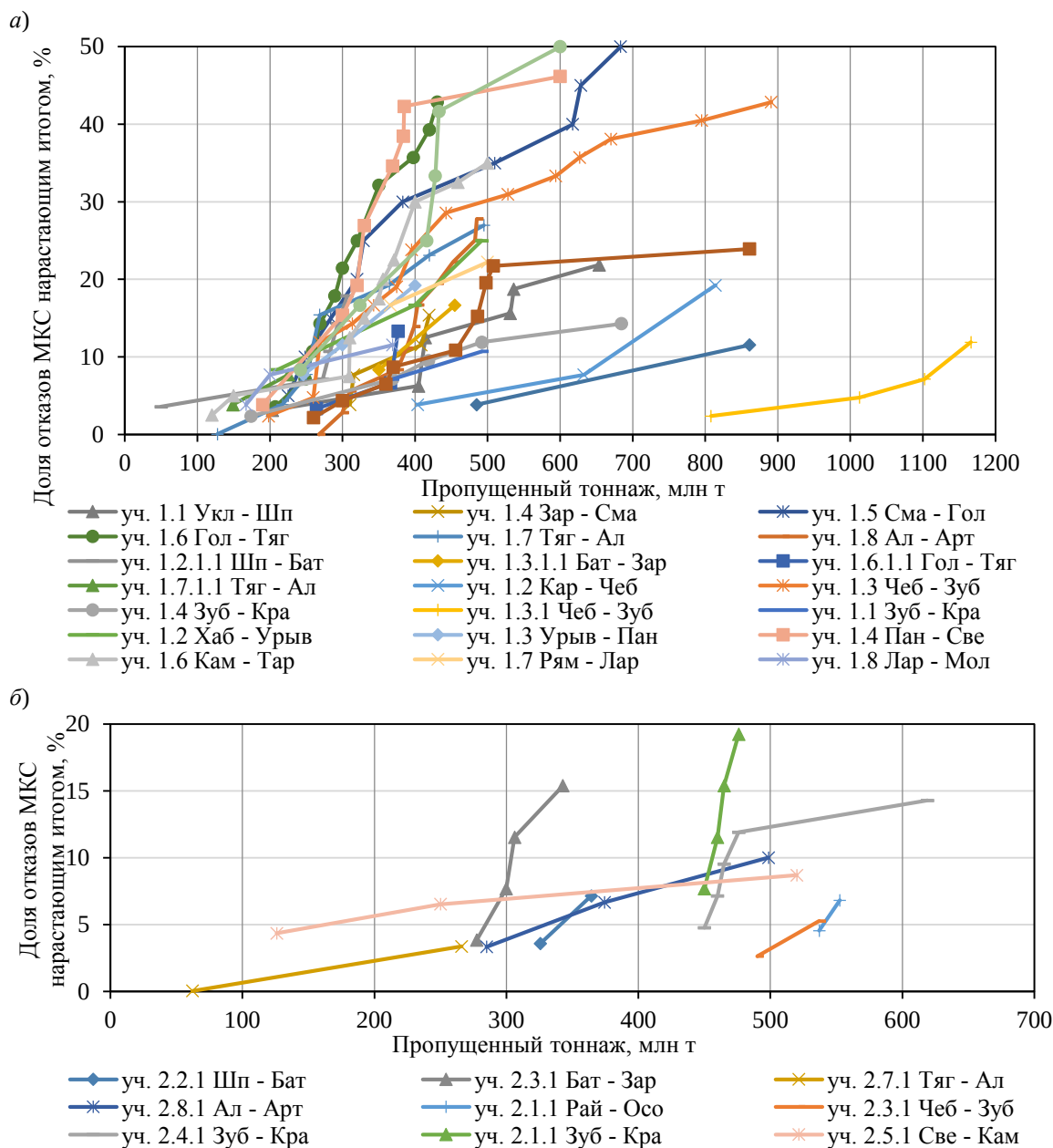


Рис. 1. Изменение доли отказов изостыков на участках Средсибиря:
а – I путь; б – II путь

По I пути Среднесибирской магистрали в диапазоне пропущенного тоннажа 150...750 млн т интенсивность изменения доли отказов изостыков колеблется в пределах 1,7...10,4 % на 100 млн т, в среднем – 4,9 % на 100 млн т; по II пути – в диапазоне пропущенного тоннажа 50...550 млн т – 0,7...2 % на 100 млн т, со средним значением 1,5 % на 100 млн т.

По I пути Транссибирской магистрали в диапазоне пропущенного тоннажа 50...1 150 млн т интенсивность изменения доли отказов изостыков находится в пределах 1,4...12,6 % на 100 млн т при среднем значении 6,7 % на 100 млн т; по II пути – в интервале пропущенного тоннажа 150...1 150 млн т – 1,2...9,8 % на

100 млн т, со средним значением 5,9 % на 100 млн т.

Для того чтобы отследить среднюю динамику роста доли отказов изостыков нарастающим итогом, необходимо по средним значениям из табл. 8 и 9 построить графики зависимости доли отказов изолирующих стыков нарастающим итогом от пропущенного тоннажа. Значения средней доли отказов изостыков нарастающим итогом по I и II пути в условиях Среднесибирской магистрали представлены в табл. 8, Транссибирской магистрали – в табл. 9.

На рис. 4 в качестве примера для I пути Транссиба приведено соотношение среднего

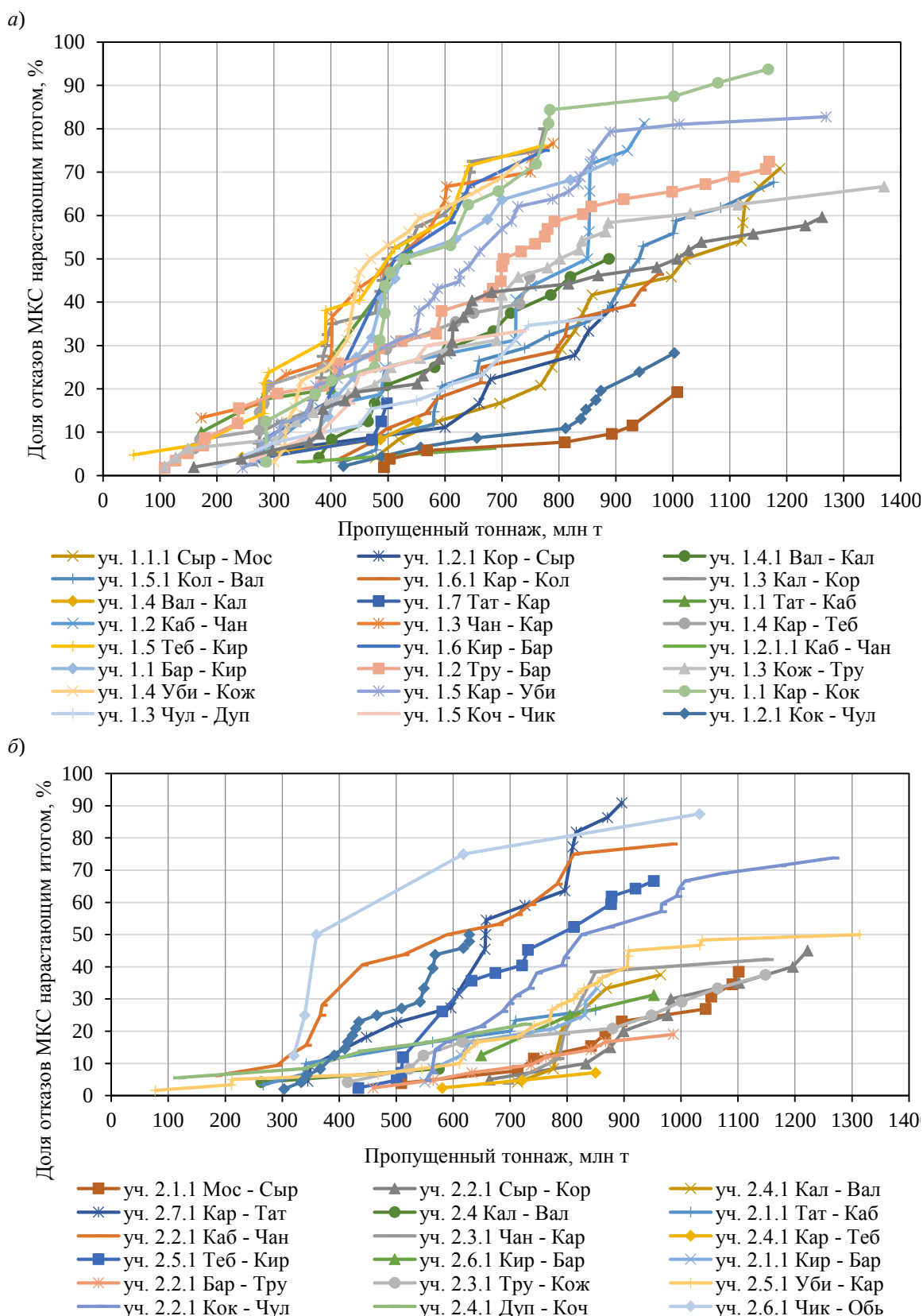


Рис. 2. Изменение доли отказов изостыков на участках Транссиба:
а – I путь; б – II путь

значения доли отказов МКС и ряда участков, на которых первые отказы изолирующих стыков приходятся на значения начала наработки тоннажа до 200 млн т. Для большей наглядно-

сти средние значения доли отказов изостыков нарастающим итогом по Среднесибирской и Транссибирской магистралям объединены и представлены на рис. 5.

Таблица 4

**Интенсивность изменения доли отказов МКС нарастающим итогом на участках Средсиба,
% на 100 млн т**

Номер участка	Пропущенный тоннаж, млн т						
	100...200	200...300	300...400	400...500	500...600	600...700	700...800
1.1 Укл – Шп	–	1,6	1,4	8,7	5,7	–	–
1.3 Чеб – Зуб	–	11,1	10,5	6,0	3,8	4,8	1,9
1.5.1 Све – Кам	–	–	5,1	10,2	2,6	0,6	0,6
...	...	...	...	...	...	...	...
<i>Среднее</i>	1,7	7,6	10,4	6,3	3,1	3,1	2,7

Таблица 5

**Интенсивность изменения доли отказов МКС нарастающим итогом по II пути Средсиба,
% на 100 млн т**

Номер участка	Пропущенный тоннаж, млн т					
	0...100	100...200	200...300	300...400	400...500	500...600
2.7.1 Тяг – Ал	0,7	1,5	1,2	–	–	–
2.8.1 Ал – Арт	–	–	–	3,2	2,8	–
2.5.1 Све – Кам	–	–	1,2	0,8	0,8	–
...	...	...	...	...	...	...
<i>Среднее</i>	0,7	1,5	1,2	2,0	1,8	1,8

Таблица 6

**Интенсивность изменения доли отказов МКС нарастающим итогом по I пути Транссиба,
% на 100 млн т**

Номер участка	Пропущенный тоннаж, млн т										
	0–100	100–200	200–300	300–400	400–500	500–600	600–700	700–800	800–900	900–1 000	1 000–1 100
1.5 Теб – Кир	5,8	3,4	15,2	14,1	11,5	8,9	14,6	–	–	–	–
1.2 Тру – Бар	1,5	8,5	8,8	4,1	7,1	8,1	10,1	9,7	5,5	2,1	3,4
1.3 Кож – Тру	1,9	5,1	1,2	8,8	7,0	5,1	10,9	9,7	8,8	1,5	2,2
–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
<i>Среднее</i>	3,1	5,7	7,4	8,4	12,6	7,2	8,3	7,5	9,8	4,7	4,2

Таблица 7

**Интенсивность изменения доли отказов МКС нарастающим итогом по II пути Транссиба,
% на 100 млн т**

Номер участка	Пропущенный тоннаж, млн т										
	100–200	200–300	300–400	400–500	500–600	600–700	700–800	800–900	900–1 000	1 000–1 100	1 100–1 200
2.2.1 Каб – Чан	–	3,9	22,6	9,8	7,2	4,8	15,9	5,7	–	–	–
2.5.1 Уби – Кар	1,2	2,5	0,5	1,2	2,5	8,2	11,0	10,5	6,7	2,6	0,5
2.4.1 Дуп – Коч	–	1,3	3,8	3,5	2,8	3,2	–	–	–	–	–
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
<i>Среднее</i>	1,2	2,6	7,8	6,3	8,0	6,7	7,8	9,8	6,2	5,1	2,9

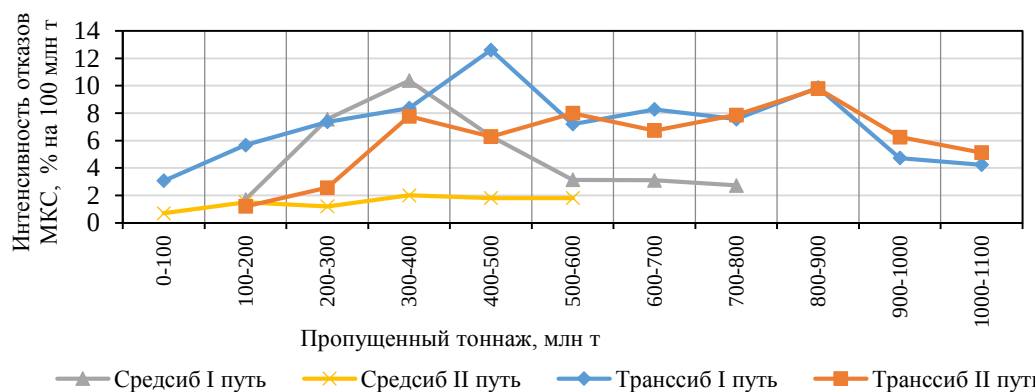


Рис. 3. Интенсивности изменения доли отказов МКС от интервала пропущенного тоннажа по I и II пути Среднесибирской и Транссибирской магистралей

Таблица 8

Доля отказов изолирующих стыков по I и II пути Средсиба нарастающим итогом, %

Номер пути	Пропущенный тоннаж, млн т								
	0	100	200	300	400	500	600	700	800
I	–	0,0	1,7	9,2	19,6	25,9	29,1	32,2	34,9
II	0,0	0,7	2,2	3,4	5,4	7,2	9,0	–	–

Таблица 9

Доля отказов изолирующих стыков по I и II пути Транссиба нарастающим итогом, %

Номер пути	Пропущенный тоннаж, млн т												
	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1 000	1 100	1 200
I	0,0	3,1	8,7	16,1	24,5	37,1	44,3	52,5	60,1	69,9	74,7	78,9	80,3
II	–	0,0	1,2	3,8	11,5	17,8	25,8	32,5	40,4	50,2	56,5	61,6	64,4

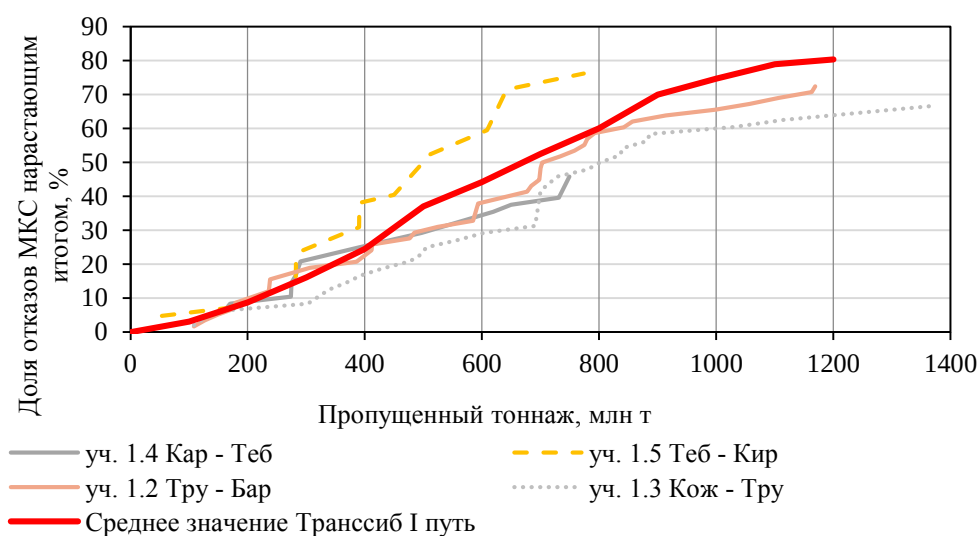


Рис. 4. Среднее значение доли отказов МКС по I пути Транссиба

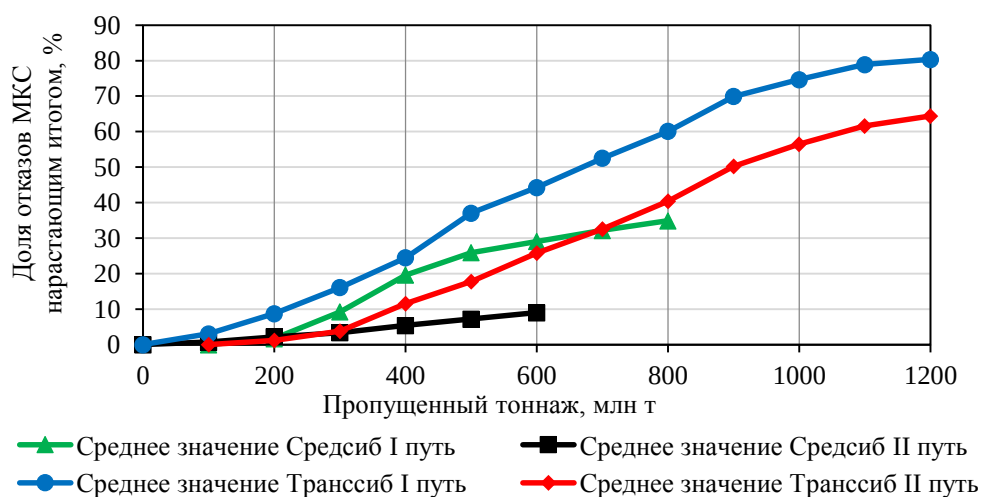


Рис. 5. Средние значения доли отказов МКС нарастающим итогом

Полученные результаты являются новыми (для условий Транссиба и Средсиба) и могут быть использованы для последующего анализа соотношений срока службы изостыков и срока службы всей конструкции пути для обеспечения

оптимального соотношения, анализа надежности изостыков и уровня ее дальнейшего повышения при совершенствовании конструкции МКС для снижения затрат на техническое обслуживание железнодорожного пути.

Выводы

Анализ зависимости средних значений доли отказов изостыков нарастающим итогом от пропущенного тоннажа демонстрирует различия в динамике роста их доли отказов:

- на Транссибирской магистрали: по I пути – 16,1 % (300 млн т), 44,2 % (600 млн т), 69,9 % (900 млн т), 80,3 % (1 200 млн т); по II пути – 3,8 % (300 млн т), 25,8 % (600 млн т), 50,2 % (900 млн т) и 64,4 % (1 200 млн т);

- на Среднесибирской магистрали: по I пути – 9,3 % (300 млн т), 29,1 % (600 млн т); по II пути – 3,4 % (300 млн т), 9 % (600 млн т).

Определена средняя интенсивность роста доли эксплуатационных отказов металлоком-
позитных стыков:

- на Транссибирской магистрали: по I пути – 6,7 % на 100 млн т; по II пути – 5,9 % на 100 млн т;

- на Среднесибирской магистрали: по I пути – 5 % на 100 млн т; по II пути – 1,5 % на 100 млн т.

Предложена методика определения средней поинтервальной (от срока службы) интенсивности отказов при использовании неполного наслаивания друг на друга графиков отказов от срока службы (по разным участкам одного пути с различным уровнем начальной наработки тоннажа): для каждого участка необходимо зафиксировать значения доли отказов изостыков на каждый интервал (100 млн т пропущенного тоннажа), чтобы проследить рост доли отказов изолирующих стыков на каждые последующие 100 млн т и за весь срок эксплуатации, получив средние значения интенсивности изменения доли отказов изостыков отдельно по I и II пути.

Список источников

1. Панов В. А. Анализ существующих типов изолирующих стыков // Матрица научного познания. 2021. № 12-1. С. 51–58.
2. Могильников Ю. В., Галинуров Р. З. Оценка надежности изолирующих стыков // Информационные технологии, телекоммуникации и системы управления : сборник докладов. 2016. С. 300–305.
3. Карпущенко Н. И., Величко Д. В. Обеспечение надежности железнодорожного пути и безопасности движения поездов. Новосибирск : Издательство Сибирского государственного университета путей сообщения, 2008. 321 с.
4. Анализ технического состояния бесстыкового пути на Западно-Сибирской железной дороге / Д. В. Величко, Д. Г. Шелеметьев, Е. С. Антерейкин, А. А. Николаенко // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2017. № 3. С. 5–11.
5. Киляков А. С. Снижаем число отказов рельсовых цепей // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 5. С. 27–30.
6. Тарасов Е. М., Надежкин В. А. Анализ отказов и эволюция стратегий организационно-технических мероприятий по обслуживанию изолирующих стыков // Вестник транспорта Поволжья. 2023. № 2. С. 73–78.
7. Диагностика изолирующих стыков на основе оценки предотказных состояний / Е. М. Тарасов, А. Е. Тарасова, В. А. Надежкин, И. С. Бредун // Автоматика, связь, информатика. 2025. № 6. С. 2–4.
8. Акимов С. С. Анализ отказов элементов железнодорожного пути на Западно-Сибирской железной дороге // Политранспортные системы : материалы IX Международной научно-технической конференции. Новосибирск : Издательство Сибирского государственного университета путей сообщения, 2017. С. 158–162.
9. Результаты эксплуатации высокопрочных изолирующих стыков «АПАТЭК Р65 МК» за период 1997–2021 гг. / В. Т. Семенов, С. Н. Мелихов, А. Е. Ушаков [и др.] // Путь и путевое хозяйство. 2022. № 3. С. 25–28.
10. Тарасов Е. М., Надежкин В. А. Диагностирование в жизненном цикле изолирующих стыков рельсовых цепей // Транспорт: наука, техника, управление : научный информационный сборник. 2024. № 2. С. 45–50.
11. Смирнов В. А., Гаральд Л., Мартин К. Увеличение срока службы изолирующих стыков с помощью подшпальных прокладок // Путь и путевое хозяйство. 2022. № 9. С. 28–31.

References

1. Panov V. A. Analysis of existing types of insulating joints. *Matrix of Scientific Knowledge*. 2021;(12-1):51–58. (In Russ.).
2. Mogilnikov Yu. V., Galinurov R. Z. Assessment of the insulating joints reliability. *Information Technologies, Telecommunications, and Control Systems. Proceedings*. 2016. P. 300–305. (In Russ.).
3. Karpushchenko N. I., Velichko D. V. Ensuring the railway tracks and train safety reliability. *Novosibirsk*; 2008. 321 p. (In Russ.).

4. Velichko D. V., Shelemetyev D. G., Antereykin E. S., Nikolaenko A. A. Analysis of the technical condition of the continuous track on the West Siberian Railway. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2017;(42):5–11. (In Russ.).
5. Kilyakov A. S. Reducing the number of rail circuit failures. *Track and Track Facilities*. 2021;(5):27–30. (In Russ.).
6. Tarasov E. M., Nadezhkin V. A. Analysis of failures and evolution of strategies for organizational and technical measures for the maintenance of insulating joints. *Vestnik Transporta Povolzhya*. 2023;(2):73–78. (In Russ.).
7. Tarasov E. M., Tarasova A. E., Nadezhkin V. A., Bredun I. S. Diagnostics of insulating joints based on the assessment of pre-failure states. *Automation, Communications, and Informatics*. 2025;(6):2–4. (In Russ.).
8. Akimov S. S. Analysis of Failures of railway track elements on the West Siberian Railway. *Polytransport Systems. Proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference*. Novosibirsk: The Siberian Transport University Publishing House; 2017. P. 158–162. (In Russ.).
9. Semenov V. T., Melikhov S. N., Ushakov A. E. [et al.]. Results of the APATEK R65 MK high-strength insulating joints operation for the period 1997–2021. *Track and Track Facilities*. 2022;(3):25–28. (In Russ.).
10. Tarasov E. M., Nadezhkin V. A. Diagnostics in the life cycle of insulating joints of track chains. *Transport: science, equipment, management. Scientific Information Collection*. 2024;(2):45–50. (In Russ.).
11. Smirnov V. A., Garald L., Martin K. Increasing the service life of insulating joints using under-sleeper spacers. *Track and Track Facilities*. 2022;(9):28–31. (In Russ.).

Информация об авторах

Е. А. Мамеева – инженер Заринской дистанции пути ЗСДИ.
Д. В. Величко – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Путь и путевое хозяйство» Сибирского государственного университета путей сообщения.
В. В. Щербakov – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Инженерная геодезия» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

E. A. Mameeva – Engineer of the Zarinsky Track Distance of the West Siberian Directorate of Infrastructure.
D. V. Velichko – Candidate of Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Track and Track Facilities Department, Siberian Transport University.
V. V. Shcherbakov – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Engineering Geodesy Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 17.03.2026; одобрена после рецензирования 08.07.2026; принята к публикации 27.08.2026.

The article was submitted 17.03.2026; approved after reviewing 08.07.2026; accepted for publication 27.08.2026.

Научная статья
УДК 625.143.54
doi:10.52170/1815-9265_2026_80_66

Оценка напряженно-деформированного состояния упругой клеммы скрепления в зависимости от усилия затяжки крепежителя

Александр Александрович Войченко^{1✉}, Андрей Степанович Ильиных²

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

¹ vojcenkoaleksandr365@gmail.com✉

² asi80.2@yandex.ru

Аннотация. Надежность промежуточных рельсовых скреплений приобретает особое значение в условиях роста грузонапряженности и осевых нагрузок подвижного состава. Работоспособность узла скрепления во многом определяется усилием прижатия рельса упругой клеммой, которое в эксплуатационной практике не измеряется напрямую, а контролируется косвенно – по моменту затяжки крепежителя. Вследствие значительного расхода приложенного момента на преодоление сил трения фактическое осевое усилие в крепежителе характеризуется существенным статистическим разбросом, что приводит как к недостаточному, так и к чрезмерному нагружению клеммы. Анализ эксплуатационных отказов показывает: около 99 % случаев выхода клемм ЖБР из строя связаны с трещинообразованием и изломами, что обуславливает необходимость количественной оценки напряженного состояния клеммы во всем диапазоне реализуемых усилий затяжки.

В работе методом конечных элементов в среде APM FEM выполнено моделирование напряженно-деформированного состояния пружинной клеммы ЦП369.102 скрепления ЖБР в составе узла «клемма – рельс – упорная скоба». Установлено расположение наиболее нагруженных зон, получены аналитические зависимости напряжений в контрольных точках от осевого усилия затяжки и определены критические значения усилия, при которых напряжения в опасном сечении достигают предела текучести (около 35,4 кН) и предела прочности (около 39,5 кН) стали 60С2А. На основе статистических данных о разбросе усилия затяжки выполнена вероятностная оценка риска достижения предельных напряжений для различных состояний резьбовых поверхностей. Показано, что для новых и смазанных шурупов вероятность превышения предела текучести достигает значительных величин.

Ключевые слова: рельсовое скрепление, пружинная клемма, усилие прижатия, момент затяжки, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов

Для цитирования: Войченко А. А., Ильиных А. С. Оценка напряженно-деформированного состояния упругой клеммы скрепления в зависимости от усилия затяжки крепежителя // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 3 (80). С. 66–74. DOI 10.52170/1815-9265_2026_80_66.

Original article

Assessment of the stress-strain state of an elastic rail fastening clip as a function of the fastener tightening force

Alexander A. Voychenko^{1✉}, Andrey S. Ilinykh²

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

¹ vojcenkoaleksandr365@gmail.com✉

² asi80.2@yandex.ru

Abstract. The reliability of intermediate rail fastenings acquires particular importance under conditions of increasing traffic density and axle loads of rolling stock. The serviceability of the fastening assembly is largely determined by the rail clamping force exerted by the elastic clip, which in operational practice is not measured directly but is monitored indirectly – by the tightening torque of the fastener. Due to the significant expenditure of the applied torque on overcoming friction forces, the actual axial force in the fastener is characterized by considerable statistical scatter, which leads to both insufficient and excessive loading of the clip. Analysis of in-service failures shows that about 99 % of cases of ZhBR clip failure are associated with crack formation and fractures, which necessitates a quantitative assessment of the stress state of the clip over the entire range of attainable tightening forces.

In this study, the finite element method in the APM FEM environment was used to model the stress-strain state of the CP369.102 spring clip of the ZhBR fastening within the 'clip – rail – thrust bracket' assembly. The location of the most heavily loaded zones was established, analytical dependences of stresses at the control points on the axial tightening force were obtained, and the critical force values were determined at which stresses in the dangerous section reach the yield strength (about 35.4 kN) and the ultimate strength (about 39.5 kN) of 60S2A steel. Based on statistical data on the scatter of the tightening force, a probabilistic assessment of the risk of reaching limit states was performed for various conditions of the threaded surfaces. It is shown that for new and lubricated screws the probability of exceeding the yield strength reaches significant values.

Keywords: rail fastening, spring clip, clamping force, tightening torque, stress-strain state, finite element method

For citation: Voychenko A. A., Ilinykh A. S. Assessment of the stress-strain state of an elastic rail fastening clip as a function of the fastener tightening force. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(80):66–74. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_80_66.

Введение

Современные условия эксплуатации железных дорог характеризуются ростом грузонапряженности, увеличением интенсивности движения и повышением осевых нагрузок подвижного состава. На значительной части сети эксплуатируются вагоны с осевой нагрузкой 23,5 т/ось, а на отдельных направлениях применяются и более высокие нагрузки – 25 т/ось и выше. В перспективе развитие тяжеловесного движения предполагает дальнейшее увеличение нагрузочного воздействия на путь. В этих условиях особое значение приобретает надежность элементов верхнего строения пути, в том числе промежуточных рельсовых креплений [1].

Промежуточные рельсовые крепления являются одним из наиболее ответственных элементов конструкции бесстыкового пути. Они обеспечивают фиксацию рельса на шпале, сохранение ширины колеи, противодействие угону рельсовых плетей, передачу вертикальных и горизонтальных нагрузок на подрельсовое основание, а также демпфирование динамических воздействий. Эффективность выполнения этих функций напрямую зависит от того, насколько корректно реализовано усилие прижатия рельса упругой клеммой [2]. При этом прижатие рельса формируется усилием затяжки прикрепителя: осевое усилие, возникающее в резьбовом соединении при затяжке гайки или шурупа, передается через клемму и обеспечивает необходимое усилие прижатия рельса к основанию. Согласно Инструкции [3] каждый узел крепления при сборке должен обеспечивать усилие прижатия рельса к основанию не менее 20 кН, а для регионов с температурными интервалами более 110 °С – не менее 25 кН.

В действующей практике сборки и обслуживания рельсовых креплений усилие прижатия непосредственно не измеряется. Контроль осу-

ществляется косвенно – по величине момента затяжки гайки или шурупа. Так, для обеспечения нормативного усилия прижатия рельса креплениями ЖБР установлены моменты затяжки: гайки – 200 Н·м, шурупа – 250 Н·м [3, 4]. Однако такой подход не позволяет с достаточной точностью определить фактическое усилие в резьбовом прикрепителе, поскольку значительная часть приложенного момента расходуется на преодоление сил трения.

В работе [5] установлено, что при сборке узлов креплений ЖБР с нормативным моментом затяжки осевое усилие в прикрепителях имеет существенный разброс, в зависимости от состояния резьбовых поверхностей может варьироваться, с учетом двух стандартных отклонений, от 19,91 до 47,52 кН. Поскольку прижатие рельса напрямую определяется этим осевым усилием, его разброс приводит к нестабильности фактического усилия прижатия. Недостаточное прижатие может привести к снижению сопротивления продольному и поперечному смещению рельса, нарушению стабильности ширины колеи, повышенному износу элементов крепления и увеличению риска развития дефектов пути. В то же время чрезмерное усилие затяжки способно вызвать повреждение элементов крепления.

Наиболее важным с точки зрения надежности элементом узла рельсового крепления является упругая клемма [6]. На рис. 1 представлено соотношение количества выведенных из строя клемм ЖБР и общего количества введенных в эксплуатацию, а на рис. 2 – процентное соотношение причин отказа клемм по данным работы [7].

Анализ статистики отказов позволяет оценить как масштаб проблемы, так и преобладающие механизмы разрушения клемм. Относительная доля отказов клемм в прямых участках пути составляет около 9 %, в кривых

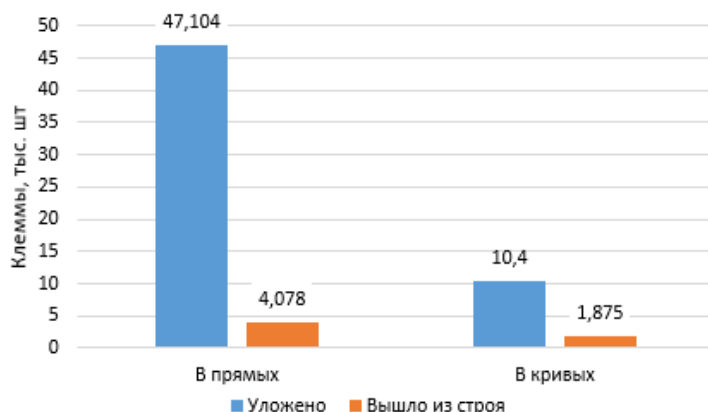


Рис. 1. Структура выхода из строя клемм ЖБР

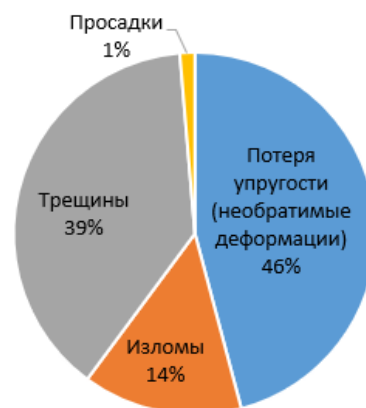


Рис. 2. Причины выхода из строя клемм ЖБР

участках – около 18 %. Большинство отказов связано с нарушением их целостности. Более половины всех причин составляют трещины и изломы. Это указывает на то, что основным механизмом разрушения является усталостное и хрупкое повреждение металла под действием циклических динамических нагрузок от подвижного состава. Просадки (1 %) играют незначительную роль.

В этой связи возникает необходимость количественной оценки напряженного состояния клеммы во всем диапазоне возможных значений усилия затяжки и определения уровней, при которых возникает риск исчерпания несущей способности материала.

Целью настоящего исследования является оценка напряженно-деформированного состояния пружинной клеммы крепления ЖБР при варьировании усилия затяжки прикрепителя, выявление наиболее нагруженных зон, а также

установление критических значений усилия, соответствующих достижению предела текучести и предела прочности материала клеммы.

Методика исследований

В среде APM FEM разработаны трехмерные модели клеммы ЦП369.102, упорной скобы и подошвы рельса Р65. Положение моделей в сборке соответствует рабочему положению элементов крепления ЖБР. Осевое усилие, возникающее при затяжке прикрепителя, имитировано прикладыванием распределенной силы к пластине, контактирующей с концевыми участками клеммы (рис. 3). Принятая расчетная схема позволяет воспроизвести реальный характер деформирования клеммы при затяжке прикрепителя и оценить распределение напряжений в ее сечениях.

Для моделей заданы следующие граничные условия: подошва рельса и упорная скоба

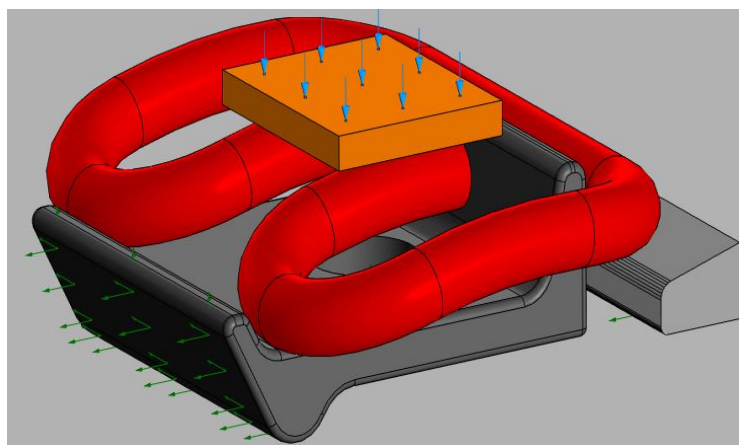


Рис. 3. 3D-модель элементов крепления ЖБР:

голубые стрелки – распределенная сила; зеленые стрелки – закрепления упорной скобы и рельса

зафиксированы от горизонтальных и вертикальных перемещений; в соприкасающихся поверхностях «клемма – рельс», «клемма – упорная скоба», «клемма – пластина» задан скользящий контакт с коэффициентом трения 0,15. Для клеммы выбран материал – сталь 60С2А с параметрами согласно [8] для закалки при 870 °С в масле и отпуске при 420 °С на воздухе, для рельса – сталь 76АФ согласно [9], для упорной скобы и пластины – сталь 20 согласно [10]. Заданные параметры материалов элементов модели представлены в табл. 1.

В расчетной модели использованы десяти-узловые тетраэдральные конечные элементы. Для клеммы принят размер элемента 1 мм, для остальных элементов сборки (с целью упрощения расчетов) – 5 мм. Конечно-элементная модель клеммы включает 198 215 конечных элементов, образованных 336 863 узлами.

Значения эквивалентных напряжений в клемме и их распределение отображены на рис. 4. Исследование напряженно-деформированного состояния продемонстрировало, что максимальные эквивалентные напряжения наблюдаются на концевых и боковых участках, в зонах технологических перегибов.

На примере трех характерных точек деформации клеммы произведена оценка зависимости напряжений в клемме от усилия затяжки крепежителя. Выбор характерных точек выполнен на основании анализа поля эквивалентных напряжений. Схема контрольных точек представлена на рис. 5.

К исследованию принята точка 3 в зоне максимальных напряжений, расположенная в нижнем радиусном переходе ветви клеммы. Исследование напряжений в этой точке позволит определить допустимое усилие затяжки шурупа, при котором клемма сохраняет свои упругие свойства. Кроме того, выбраны точки 1 и 2, в которых наблюдается характерное изменение градиента напряжений. В средних зонах переходов напряжения изменяются монотонно, поэтому такие точки целесообразно использовать в качестве контрольных.

Диапазон усилий затяжки выбран от 1 до 51 кН с шагом 2 кН исходя из данных о разбросе усилия затяжки путевых шурупов, приведенных в исследовании [5], что обеспечивает полное перекрытие практически возможных эксплуатационных значений.

Таблица 1

Параметры материалов элементов модели, МПа

Параметр	Клемма	Рельс	Скоба упорная, пластина
Предел прочности	1 750	1 120	410
Предел текучести	1 570	815	230
Предел выносливости при растяжении	640	209	204
Предел выносливости при кручении	465	139	100

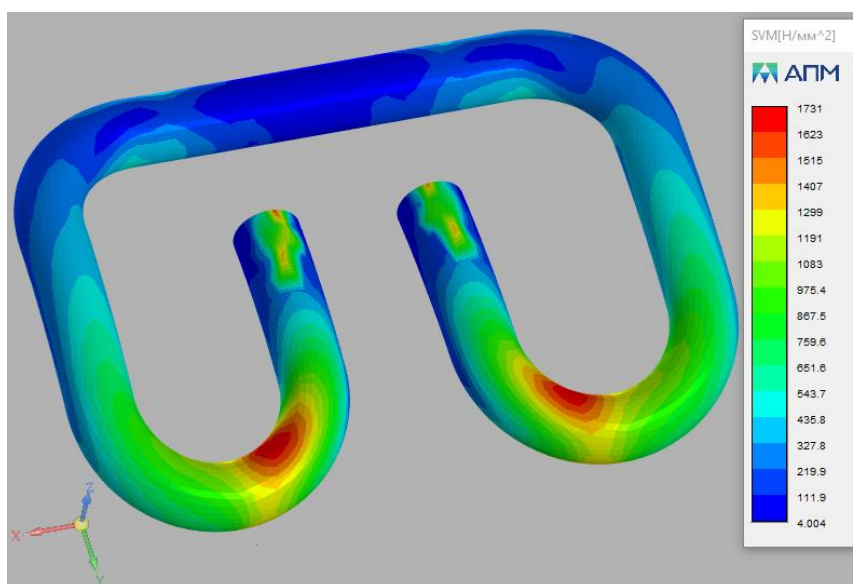


Рис. 4. Карта распределения напряжений в упругой клемме ЖБР

Результаты исследований

По результатам выполненных конечно-элементных расчетов построена точечная диаграмма (рис. 6). В результате аппроксимации данных получены зависимости для расчета напряжений в каждой контрольной зоне.

Зависимость напряжений в зоне клеммы, соответствующей контрольной точке 3, описывается выражением

$$\sigma = 44,107Q + 8,8513, \quad (1)$$

где σ – напряжение в клемме, МПа; Q – осевое усилие затяжки крепежителя, кН.

Из этой зависимости можно определить ориентировочные значения усилия затяжки крепежителя, при которых напряжения достигают предельных уровней: для достижения предела текучести $Q_{\sigma_{0,2}} = 35,4$ кН; предела прочности $Q_{\sigma_B} = 39,5$ кН.

Характер распределения напряжений по сечениям клеммы в зоне 3 представлен на рис. 7.

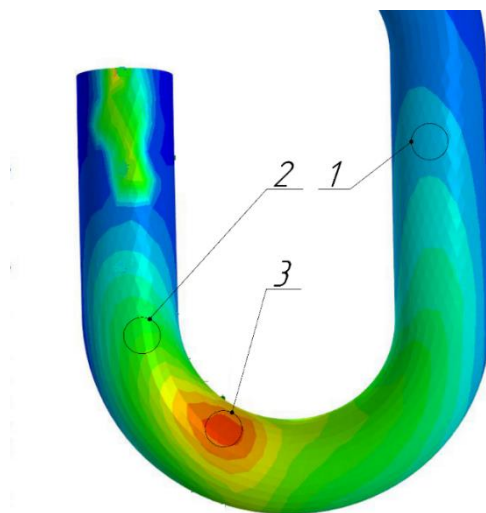


Рис. 5. Схема контрольных точек на клемме ЖБР

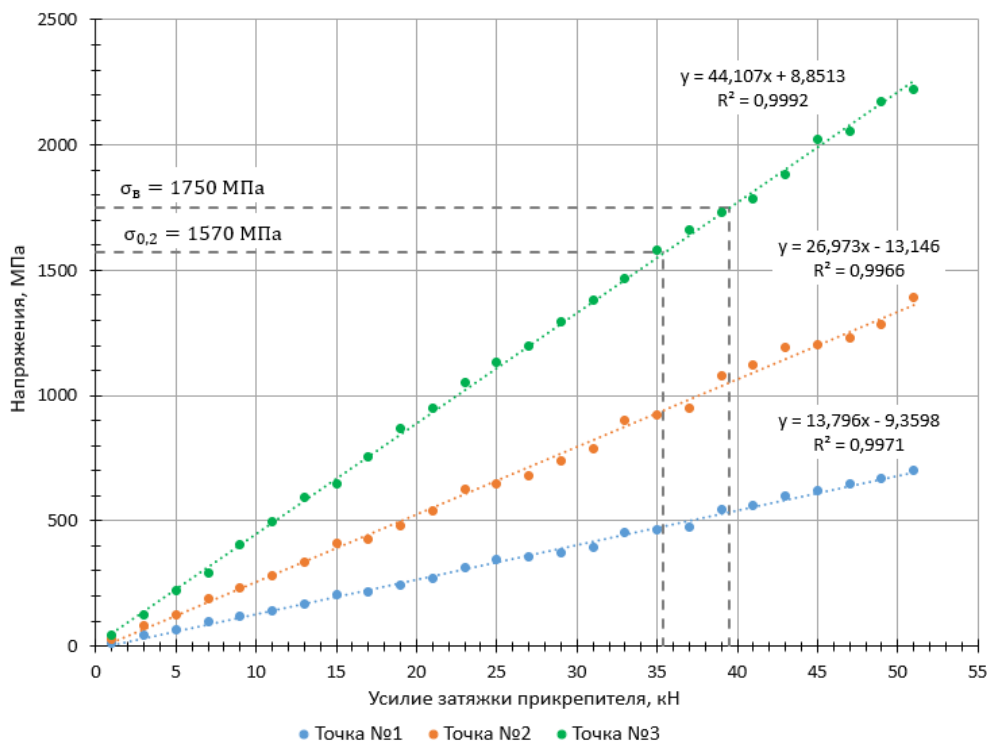


Рис. 6. Зависимость напряжений в клемме ЖБР от усилия затяжки крепежителя

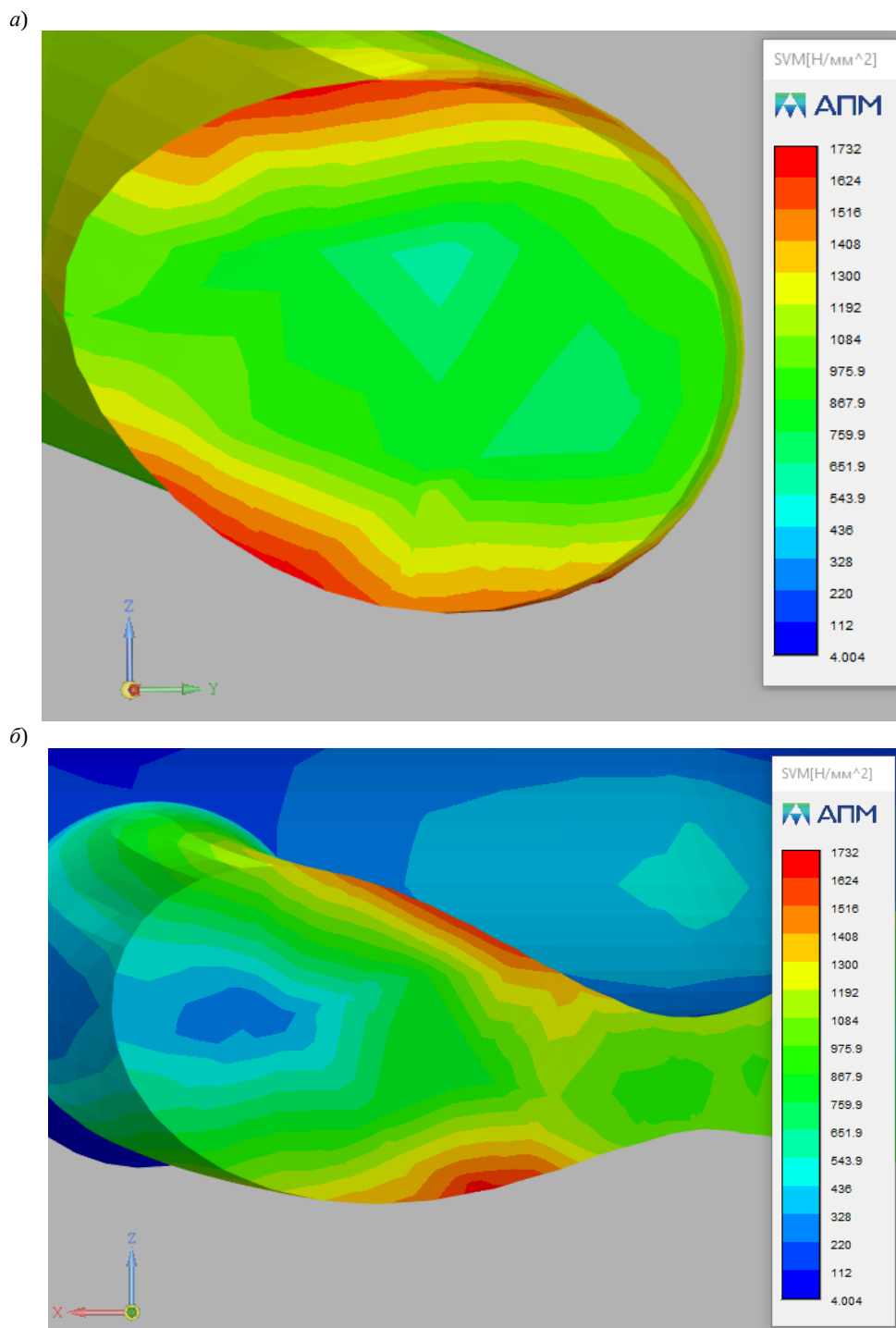


Рис. 7. Распределение интенсивностей напряжений в клемме в зоне перехода дугового нащпального участка в концевой при усилии затяжки 39 кН:

a – в сечении, параллельном плоскости YOZ; *б* – в сечении, параллельном плоскости XOZ

Анализ эпюры показывает, что максимальные напряжения возникают в поверхностных слоях (красные зоны), тогда как сердцевина сечения нагружена существенно меньше. Неравномерность напряжений по сечению с максимумами на удаленных от нейтральной оси волокнах подтверждает преобладание изгибающей и крутящей нагрузки,

что согласуется с характером работы упругой клеммы [11, 12].

Для каждой группы узлов скреплений по зависимости (1) рассчитаны уровни напряжений в клемме с учетом статистического разброса усилия затяжки шурупов. Данные по значениям среднего усилия затяжки и его разброса в зависимости от состояния резьбовой

поверхности шурупов приняты в соответствии с исследованием [5]. Поскольку фактическое усилие затяжки носит случайный характер и описывается нормальным распределением, для оценки надежности клеммы целесообразно перейти от детерминированных значений напряжений к вероятностной оценке риска достижения предельных состояний. Вероятность того, что фактическое усилие превысит критические значения по пределу текучести и по пределу прочности в опасном сечении клеммы:

$$P(Q > Q_{кр}) = 1 - \Phi(z), \quad (2)$$

где $Q_{кр}$ – критическое значение усилия затяжки крепежителя, соответствующее пределу текучести $Q_{\sigma_{0,2}}$ или пределу прочности Q_{σ_b} , кН; $\Phi(z)$ – функция стандартного нормального распределения.

$$z = \frac{Q_{кр} - \bar{Q}}{S}, \quad (3)$$

где $\bar{Q}$ – среднее значение усилия затяжки крепежителя, кН; S – среднеквадратическое отклонение, кН.

Результаты расчетов представлены в табл. 2. Ржавые и загрязненные шурупы обеспечивают наименьшее среднее усилие затяжки. При этом напряжение в наиболее опасном сечении клеммы составляет около 1 353 МПа, что ниже предела текучести. Очистка резьбы приводит к увеличению среднего усилия до 34,07 кН, а напряжения в клемме достигают примерно 1 511 МПа, т. е. становятся почти равны пределу текучести. Новые и смазанные шурупы дают максимальное среднее усилие 38,3 кН. Соответствующее напряжение в опасном сечении клеммы возрастает до 1 698 МПа, это значение превышает предел текучести и сопоставимо с пределом прочности стали 60С2А.

С учетом статистического разброса усилия затяжки риск достижения предельных напряжений существенно возрастает. Уже в пределах одного стандартного отклонения возможны значения усилия, при которых напряжения в клемме превышают предел текучести, а в случае с новыми и смазанными шурупами – еще и предел прочности. В пределах же двух стандартных отклонений расчетные напряжения превышают предел прочности во всех без исключения рассмотренных группах. Таким образом, при определенных сочетаниях состояния резьбы и реализуемого усилия затяжки напряжения в клемме могут выходить за предел прочности материала, что требует отдельного рассмотрения возможных последствий для работоспособности клеммы.

Подобное превышение предела прочности имеет ряд критических последствий для работы клеммы. Во-первых, важно отметить, что мгновенного полного разрушения клеммы при этом не происходит: основная часть сечения испытывает напряжения ниже пределов прочности и текучести. Она продолжает воспринимать основную нагрузку, удерживая конструкцию от разрушения. Во-вторых, несмотря на сохранение общей целостности, в зоне локального максимума напряжений материал полностью истощает свою несущую способность. Это неизбежно приводит к пластическим деформациям, образованию микротрещин и других локальных дефектов поверхностных слоев.

Образовавшиеся поверхностные микротрещины, в свою очередь, становятся сильными концентраторами напряжений. При дальнейшем эксплуатационном нагружении, и особенно при циклическом (переменном) воздействии поезда нагрузки, эти дефекты могут распространяться вглубь сечения, что в конечном итоге может привести к усталостному или хрупкому разрушению клеммы.

Таблица 2

Напряжения в клемме с учетом разброса усилия затяжки крепежителя

Группа узлов скреплений (шурупов)	$\bar{Q}$, кН	S , кН	Максимальные напряжения в клемме, МПа			$P(Q > Q_{\sigma_{0,2}})$	$P(Q > Q_{\sigma_b})$
			при $\bar{Q}$	при $\bar{Q} + S$	при $\bar{Q} + 2S$		
Загрязненные, ржавые	30,47	5,28	1 353	1 586	1 819	0,18	0,04
Почищенные	34,07	4,90	1 511	1 728	1 944	0,39	0,14
Новые, смазанные	38,3	4,04	1 698	1 876	2 054	0,76	0,38

Выводы

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. Методом конечных элементов в среде АРМ FEM выполнено моделирование напряженно-деформированного состояния пружинной клеммы ЦП369.102 крепления ЖБР. Установлено, что максимальные эквивалентные напряжения локализуются в поперечных сечениях концевых и боковых участков клеммы в зонах технологических перегибов, при этом наиболее нагруженным является сечение в области перехода дуговых наспальных участков в концевые.

2. Анализ распределения напряжений по сечению показал, что максимальные значения возникают в поверхностных слоях, удаленных от нейтральной оси, тогда как сердцевина сечения нагружена существенно меньше. Это подтверждает преобладание изгибающей и крутящей нагрузки и согласуется с характером работы упругой клеммы.

3. Для наиболее опасной зоны 3 получена зависимость, позволяющая по величине осевого усилия определять уровень напряжений в клемме. На основе полученной зависимости

рассчитаны критические значения усилия затяжки: предел текучести стали 60С2А достигается при усилии около 35,4 кН, а предел прочности – при усилии около 39,5 кН. Эти значения находятся в пределах диапазона усилий, практически реализующихся при сборке узлов крепления.

4. Вероятностный анализ с учетом статистического разброса усилия затяжки показал, что риск достижения предельных напряжений существенно зависит от состояния резьбовых поверхностей. Для новых и смазанных шурупов вероятность превышения предела текучести составляет 0,76, а предела прочности – 0,38, тогда как для загрязненных и ржавых шурупов эти значения снижаются до 0,18 и 0,04 соответственно.

5. Превышение предела прочности в зоне локального максимума напряжений не вызывает мгновенного разрушения клеммы, однако приводит к локальным пластическим деформациям и образованию поверхностных микротрещин, которые при циклическом эксплуатационном нагружении могут развиваться и провоцировать усталостное или хрупкое разрушение клеммы.

Список источников

1. Определение напряженно-деформированного состояния упругой клеммы рельсового крепления W30 / В. С. Коссов, О. Г. Краснов, М. В. Тимаков [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2025. Т. 84, № 1. С. 51–59.
2. Бочкарев Д. И., Лапушкин А. С. Современное состояние, анализ работы и перспективы развития промежуточных рельсовых креплений // Механика машин, механизмов и материалов. 2019. № 2 (47). С. 85–92.
3. Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14.12.2016 № 2544р. Москва : ОАО «РЖД», 2016. 176 с.
4. Инструкция на сборку, укладку и эксплуатацию пути с различными модификациями рельсового крепления ЖБР на железобетонных шпалах : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 05.04.2018 № 689р. Москва : ОАО «РЖД», 2018. 41 с.
5. Ильиных А. С., Войченко А. А., Абрамова Т. С. Оценка усилия затяжки путевых шурупов упругих рельсовых креплений методом тензометрии // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2025. № 3. С. 8–17.
6. Мезин И. Ю., Лимарев А. С., Ушаков М. Ю. Анализ требований к потребительским свойствам рельсовых креплений и условиям производства пружинных клемм // Качество в обработке материалов. 2016. № 2 (6). С. 22–27.
7. Ронжина Ю. В. Термическое упрочнение быстро движущимся потоком воды упругих клемм рельсовых креплений : специальность 05.16.09 «Материаловедение (машиностроение)» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ронжина Юлия Вадимовна ; Московский государственный автомобильно-дорожный институт (технический университет). Москва, 2013. 226 с.
8. ГОСТ 14959–2016. Металлопродукция из рессорно-пружинной нелегированной и легированной стали. Технические условия : приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10 марта 2017 г. № 112-ст введен в действие с 1 января 2018 г. Москва : Стандартинформ, 2017. 28 с.
9. ГОСТ Р 51685–2013. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия : введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 14 октября 2013 г. № 1155-ст : дата введения 2014-07-01. Москва : Стандартинформ, 2013. 95 с.
10. ГОСТ 1050–2013. Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия : приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 октября 2014 г. № 1451-ст введен в действие с 01.01.2015. Минск : Стандартинформ, 2015. 40 с.

11. Виноградов А. Г. Совершенствование конструкции и технологии изготовления пружинных клемм крепления рельсов на основе моделирования процесса пластической гибки : специальность 05.02.09 «Технологии и машины обработки давлением» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Виноградов Александр Георгиевич ; Магнитогорский государственный технический университет имени Г. И. Носова. Магнитогорск, 2013. 18 с.

12. Железков О. С., Лактюшин А. А., Макаров Б. Б. Внутренние силовые факторы и напряжения в пружинных клеммах рельсовых креплений при их установке // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : тезисы 80-й Международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 18–22 апреля 2022 г. Магнитогорск : Магнитогорский государственный технический университет имени Г. И. Носова, 2022. Т. 1. С. 162.

References

1. Kossov V. S., Krasnov O. G., Timakov M. V. [et al.] Determination of the stress-strain state of the elastic clip of the W30 rail fastening. *Bulletin of the Research Institute of Railway Transport*. 2025;84(1):51–59. (In Russ.).
2. Bochkarev D. I., Lapushkin A. S. Current state, performance analysis and development prospects of intermediate rail fastenings. *Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*. 2019;(47):85–92. (In Russ.).
3. Instructions for the device, laying, maintenance and repair of a continuously welded rail track: approved by Russian Railways No. 2544r dated 14.12.2016. Moscow: Russian Railways; 2016. 176 p. (In Russ.).
4. Instruction for the assembly, laying and operation of track with various modifications of the ZBR rail fastening on reinforced concrete sleepers: approved by order of Russian Railways No. 698r dated 05.04.2018. Moscow: Russian Railways; 2018. 41 p. (In Russ.).
5. Ilinykh A. S., Voychenko A. A., Abramova T. S. Evaluation of the tightening force of track screws of elastic rail fastenings by the strain gauge method. *Bulletin of Rostov State Transport University*. 2025;(3):8–17. (In Russ.).
6. Mezin I. Yu., Limarev A. S., Ushakov M. Yu. Analysis of requirements for the consumer properties of rail fastenings and the production conditions of spring clips. *Quality in Materials Processing*. 2016;(6):22–27. (In Russ.).
7. Ronzhina Yu. V. Thermal hardening of elastic clips of rail fastenings by a fast-moving water flow. Specialty 05.16.09 'Materials Science (Mechanical Engineering)'. Dissertation for the degree of Candidate of Engineering; Moscow State Automobile and Road Technical University (MADI). Moscow; 2013. 226 p. (In Russ.).
8. GOST 14959–2016. Metal products from spring non-alloyed and alloyed steel. Specifications. Moscow: Standartinform; 2017. 28 p. (In Russ.).
9. GOST R 51685–2013. Railway rails. General specifications: put into effect by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology No. 1155-st dated 14.10.2013. Moscow: Standartinform; 2013. 95 p. (In Russ.).
10. GOST 1050–2013. Metal products from non-alloyed structural quality and special steels. General specifications: interstate standard: put into effect on 01.01.2015. Minsk: Standartinform; 2015. 40 p. (In Russ.).
11. Vinogradov A. G. Improvement of the design and manufacturing technology of spring rail fastening clips based on modeling of the plastic bending process. Specialty 05.02.09 'Metal Forming Technologies and Machines'. Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Engineering; Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk; 2013. 18 p. (In Russ.).
12. Zhelezkov O. S., Laktyushin A. A., Makarov B. B. Internal force factors and stresses in spring clips of rail fastenings during their installation. *Actual Problems of Modern Science, Technology and Education. Proceedings of the 80th International Scientific and Technical Conference, Magnitogorsk, April 18-22, 2022*. Vol. 1. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University; 2022. P. 162. (In Russ.).

Информация об авторах

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

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

Information about the authors

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

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

Статья поступила в редакцию 26.06.2026; одобрена после рецензирования 06.07.2026; принята к публикации 31.08.2026.

The article was submitted 26.06.2026; approved after reviewing 06.07.2026; accepted for publication 31.08.2026.

Научная статья
УДК 625.1
doi:10.52170/1815-9265_2026_80_75

Подходы к определению необходимой температуры закрепления рельсовых плетей бесстыкового пути

Владимир Леонидович Шаповалов¹, Евгений Викторович Мироненко^{2✉},
Елена Владимировна Корниенко³

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

¹ cpd@rgups.ru

² zhenia.mironenko@yandex.ru✉

³ pph@rgups.ru

Аннотация. Бесстыковой путь является основной и наиболее прогрессивной конструкцией верхнего строения пути, ежегодно полигон укладки бесстыкового пути увеличивается в связи с его преимуществами перед звеньевым путем: отсутствием ударного воздействия и расстройств пути в стыках, повышением сроков службы элементов верхнего строения пути и подвижного состава, уменьшением шума, снижением сопротивления движению поездов и др. При строгом соблюдении температурного режима работы бесстыковой путь эффективнее, проще в эксплуатации и безопаснее звеньевого. В настоящее время повсеместно применяется температурно-напряженная конструкция бесстыкового пути с закреплением плетей на постоянный режим эксплуатации (без сезонных перезакреплений). В связи с этим всегда был и остается актуальным вопрос: как правильно определить необходимую температуру для закрепления рельсовых плетей? Ведь продольные силы и напряжения, возникающие при изменении температуры рельсов относительно температуры их закрепления, в летнее и зимнее время достигают высоких значений, создающих угрозу потери устойчивости рельсовых плетей или их излома.

Цель работы – анализ существующих на железных дорогах России, а также на железных дорогах мира способов определения оптимального температурного интервала закрепления рельсовых плетей, при котором риски, связанные с воздействиями высоких значений продольных температурных сил, будут минимальными.

Из теории устойчивости и многолетней практики устройства и содержания бесстыкового пути известно, что чем выше температура закрепления рельсовой плети, тем более низкой будет вероятность потери ее устойчивости, и наоборот: более высокой станет вероятность излома плети в зимний период. Ввиду того что потеря устойчивости рельсовой плети является более опасным происшествием, чем ее излом, на железных дорогах России и многих других стран принято закреплять плети при более высоких температурах. Ежегодно проводится работа по повышению качества рельсовой стали, предел прочности которой в настоящее время превысил 800 МПа. Однако, помимо прочности самой плети, необходимо также учитывать прочность болтовых стыковых соединений на примыканиях к стрелочным переводам. Для предотвращения среза стыковых болтов в период воздействия низких температур предлагается сезонное перезакрепление 200-метровых концов длинных и сверхдлинных рельсовых плетей (длиной до блок-участка или до перегона). Более радикальным способом решения вопроса прочности стыковых болтов в зимний период является сварка рельсовых плетей со стрелочными переводами.

Ключевые слова: бесстыковой путь, рельсовые плети, устойчивость, температура закрепления, продольная сила

Для цитирования: Шаповалов В. Л., Мироненко Е. В., Корниенко Е. В. Подходы к определению необходимой температуры закрепления рельсовых плетей бесстыкового пути // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 3 (80). С. 75–84. DOI 10.52170/1815-9265_2026_80_75.

Original article

Approaches to determining the required fastening temperature of continuously welded rail (CWR) track

Vladimir L. Shapovalov¹, Evgeny V. Mironenko^{2✉}, Elena V. Kornienko³

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

¹ cpd@rgups.ru

² zhenia.mironenko@yandex.ru✉

³ pph@rgups.ru

Abstract. Continuously welded rail (CWR) is the primary and most advanced design for railway superstructure, with its annual installation mileage increasing due to significant advantages over jointed track. These benefits include the elimination of impact loads and track disorders at joints, extended service life for both superstructure components and rolling stock, noise reduction, decreased train running resistance, and others. When strict temperature regimes are observed, CWR proves to be more efficient, easier to maintain, and safer than jointed track. Currently, a temperature-stressed CWR structure is universally employed, where rails are fastened for permanent operation without seasonal re-fastening. Consequently, the question of how to correctly determine the required temperature for anchoring rail strings has always been and remains relevant. Longitudinal forces and stresses arising from temperature fluctuations relative to the rail fastening temperature reach high values in summer and winter, posing a threat of buckling or fracture of the rail strings.

The objective of this work is to analyze methods for determining the optimal temperature range for fastening rail strings currently used on Russian Railways as well as on railways worldwide, aiming to minimize risks associated with high longitudinal thermal forces.

Both stability theory and long-term practice in the construction and maintenance of continuous track indicate that the higher the rail string fastening temperature, the lower the probability of its instability (buckling), and vice versa: the probability of fracture increases during the winter period. Since the loss of stability is considered a more hazardous event than fracture, it is common practice on Russian Railways and in many other countries to fasten rails at higher temperatures. Annual efforts are being made to improve the quality of rail steel, whose tensile strength currently exceeds 800 MPa. However, beyond the strength of the rail itself, the durability of bolted joint connections at turnout approaches must also be taken into account. To prevent shear failure of fishplate bolts during low-temperature exposure, the paper proposes the seasonal re-fastening of 200-meter ends of long and extra-long rail strings (extending up to a signaling block section or an entire line section). A more radical solution to ensure the integrity of joint bolts in winter is the direct welding of rail strings to turnouts.

Keywords: continuously welded track, rail strings, stability, fastening temperature, longitudinal force

For citation: Shapovalov V. L., Mironenko E. V., Kornienko E. V. Approaches to determining the required fastening temperature of continuously welded rail (CWR) track. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(80):75–84. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_80_75.

Введение

К вопросу определения оптимального температурного интервала закрепления рельсовых плетей бесстыкового пути на постоянный режим эксплуатации в разных странах мира реализуются свои подходы. На железных дорогах России температурный режим работы рельсовых плетей бесстыкового пути определяется Инструкцией [1].

Согласно п. 6.2 границы расчетного интервала закрепления, т. е. самую низкую ($\min t_3$) и самую высокую ($\max t_3$) температуры закрепления, определяют по формулам:

$$\min t_3 = t_{\max \max} - [\Delta t_y]; \quad (1)$$

$$\max t_3 = t_{\min \min} + [\Delta t_p], \quad (2)$$

где $t_{\max \max}$ и $t_{\min \min}$ – максимальная и минимальная температура рельса, °C; $[\Delta t_y]$ – повышение температуры рельсовой плети, допускаемое по условию устойчивости пути (определяется по таблице П.6.1 [1]); $[\Delta t_p]$ – допускаемое по условию прочности рельсов понижение температуры.

Значение $[\Delta t_p]$ определяется по таблице П.6.2 [1] или по расчетной формуле

$$[\Delta t_p] = \frac{[\sigma] - k_{II} \sigma_k}{\alpha E} = \frac{[\sigma] - k_{II} \sigma_k}{2,5}. \quad (3)$$

Нетрудно заметить, что верхняя граница расчетного интервала температур ограничена прочностью рельса, а нижняя – допускаемым

понижением температуры по условию устойчивости. Данные условия не имеют смысла, поскольку прочность современных рельсов давно перестала ограничивать верхний интервал закрепления, в то время как устойчивость бесстыкового пути определяется фактическим состоянием верхнего строения пути: усилием прижатия рельсов к шпалам в узлах промежуточных скреплений, степенью уплотнения и заполненностью балластной призмы, погонным сопротивлением шпал в балласте вдоль и поперек оси пути и т. д., которые методика не учитывает [2]. Поэтому закрепление плетей в пределах расчетного интервала по [1] не только не гарантирует надежность их работы, но и создает прямую угрозу безопасности движения поездов. Ввиду получаемых низких значений минимально допустимой температуры закрепления ранее существовала рекомендация [3] проводить закрепление рельсовых плетей при температуре, находящейся в верхней половине расчетного температурного интервала.

Материалы и методы исследования

В современной редакции Инструкции [1], в п. 3.4, указано, что для обеспечения прочности и устойчивости бесстыкового пути, определяемых по методике, приведенной в Приложении 6, все вновь укладываемые плети должны закрепляться при оптимальной температуре (табл. 1) [1].

Таблица 1

**Оптимальные температуры закрепления
плетей в дирекциях инфраструктуры**

Дирекция инфраструктуры	Оптимальная температура закрепления плетей $t_{\text{опт}}$, °C
Октябрьская	30 ± 5
Калининградская	
Московская	
Горьковская	
Северная	
Северо-Кавказская	35 ± 5
Юго-Восточная	
Приволжская	
Куйбышевская	30 ± 5
Свердловская	
Южно-Уральская	
Западно-Сибирская	
Красноярская	
Восточно-Сибирская	
Забайкальская	
Дальневосточная	

Примечание. Распоряжением начальника Управления пути и сооружений разрешается вводить на отдельных участках дорог (регион, ПЧ) значения оптимальной температуры закрепления, отличающиеся от приведенных.

В КНР прочность и устойчивость бесстыкового пути определяется на основании Стандарта железных дорог Китая [4]. Согласно данному стандарту расчету на прочность подвергаются только рельсы, причем для бесстыкового пути допускаются к применению только рельсы с пределом прочности при растяжении не ниже 880 МПа (п. 3.1 [4]). Расчет необходимой температуры закрепления рельсовых плетей производится по следующей формуле:

$$T_e = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} + \frac{[T_d] - [T_u]}{2} \pm \Delta T_k, \quad (4)$$

где $T_{\max}$ и $T_{\min}$ – максимальная и минимальная температура рельса, °C; $[T_d]$ – допустимое снижение температуры по условию прочности рельса, °C; $[T_u]$ – допустимое повышение температуры по условию устойчивости рельса, °C; ΔT_k – интервал коррекции температуры закрепления, составляющий 0...5 °C.

Для безбалластного железнодорожного пути температура закрепления рельсовых плетей в КНР определяется по формуле

$$T_e = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \pm \Delta T_k. \quad (5)$$

Получаемая в результате относительно низкая температура закрепления в данном случае оправдывается более высокой жестко-

стью конструкции безбалластного пути, хорошо сопротивляющейся изгибу рельсовых плетей в горизонтальной плоскости, и направлена на предохранение плетей и узлов промежуточных скреплений, жестко закрепленных в бетонных плитах, от высоких значений продольных растягивающих сил.

По аналогичной формуле производится определение необходимой температуры закрепления рельсовых плетей бесстыкового пути на щебеночном балласте согласно стандарту Международного союза железных дорог (UIC) в странах Западной Европы (Германии, Австрии, Швеции и др.). В Турции, согласно стандарту TCDD, выражение имеет вид [5]:

$$DRT = \left[\frac{T_{\text{rail min}} + T_{\text{rail max}}}{2} + 5 \right] \pm 3, \quad (6)$$

где $T_{\text{rail max}}$ – максимальная температура рельса, °C; $T_{\text{rail min}}$ – минимальная температура рельса, °C.

В США для расчета температурного интервала закрепления плетей применяется североамериканский стандарт AREMA [6] и более новый APTA [7]. Согласно этим стандартам минимальная и максимальная температуры закрепления плетей определяются по формулам:

$$\text{minimum } D.R.T. = \frac{2H_t + L_t}{3} + 10, \quad (7)$$

$$\text{maximum } D.R.T. = \left[\frac{2H_t + L_t}{3} + 25 \right] \pm 5, \quad (8)$$

где H_t – максимальная температура рельса, °F; L_t – минимальная температура рельса, °F.

В расчет по AREMA и APTA температуры должны подставляться только в градусах Фаренгейта. Итоговая, так называемая предпочтительная температура закрепления (PRLT) должна находиться между $DRT_{\min}$ и $DRT_{\max}$, при этом желательно в сторону более высокой температуры [7], поскольку «солнечная деформация рельса может быть гораздо опаснее разрыва рельса» (Appendix B, B3 [7]).

Приведенные методики, применяемые в разных странах, в том числе в России, имеют ряд недостатков. Они либо задают директивные значения без должного научного обоснования, как, например, в Швеции, где необходимая температура закрепления является фактически средним значением самой высокой и самой низкой температуры рельса, либо основаны на статических испытаниях и понятии так называемой критиче-

ской силы, превышение которой ведет к выбросу бесстыкового пути. Этот подход неоднократно был подвержен обоснованной критике, поскольку выброс пути на стенде происходит сразу, одномоментно, при превышении продольной температурной силой сопротивления балласта [8]. Это практически не имеет ничего общего с работой рельсовых плетей в реальных условиях, где при даже относительно малом превышении температуры плети над температурой ее закрепления рост напряженных неровностей в плане происходит при проходе каждого поезда. Ведущим фактором выступает время или число пропущенных осей, а величина продольной температурной силы определяет скорость нарастания стрелы изгиба. Таким образом, в настоящее время еще нет утвержденной методики, в полной мере учитывающей динамическое воздействие подвижного состава и фактор времени. Ближе всех к решению данной задачи подошел проф. В. И. Новакович со своим коллективом в работах [9–11]. На основании расчетов с учетом воздействия поездов, а также опыта эксплуатации бесстыкового пути предложено придерживаться как можно более высокой минимальной температуры закрепления и по возможности ликвидировать все болтовые стыки для обеспечения прочности и сохранения установленного температурного режима.

В настоящее время основой для оценки эффективности существующих нормативов может послужить статистика случаев потери устойчивости рельсовых плетей бесстыкового пути. На железных дорогах России количество происшествий, связанных с потерей устойчивости рельсовых плетей, из года в год находится на примерно одном уровне, составляющем в среднем 9,4 случая в год [12] (рис. 1). Из них в среднем 2,4 случая привели к сходу, против 0,15 случая схода в год при изломе рельсовых плетей в период воздействия низких температур.

В это же время на железных дорогах США ежегодно фиксировалось в среднем 34 случая схода подвижного состава, связанные с выбросом бесстыкового пути под или перед поездом [13].

В странах Европы, где действует расчет по методике Международного союза железных дорог (UIC), количество выбросов в бесстыковом пути, связанных с низкой рекомендуемой температурой закрепления, достаточно велико (рис. 2) [14].

В Великобритании в [15] приведена статистика инцидентов, связанных с критическим изгибом рельсовых плетей под воздействием высоких температур с 2006 по 2013 г. (рис. 3).

Учитывая протяженность сети железных дорог Великобритании (порядка 30 000 км

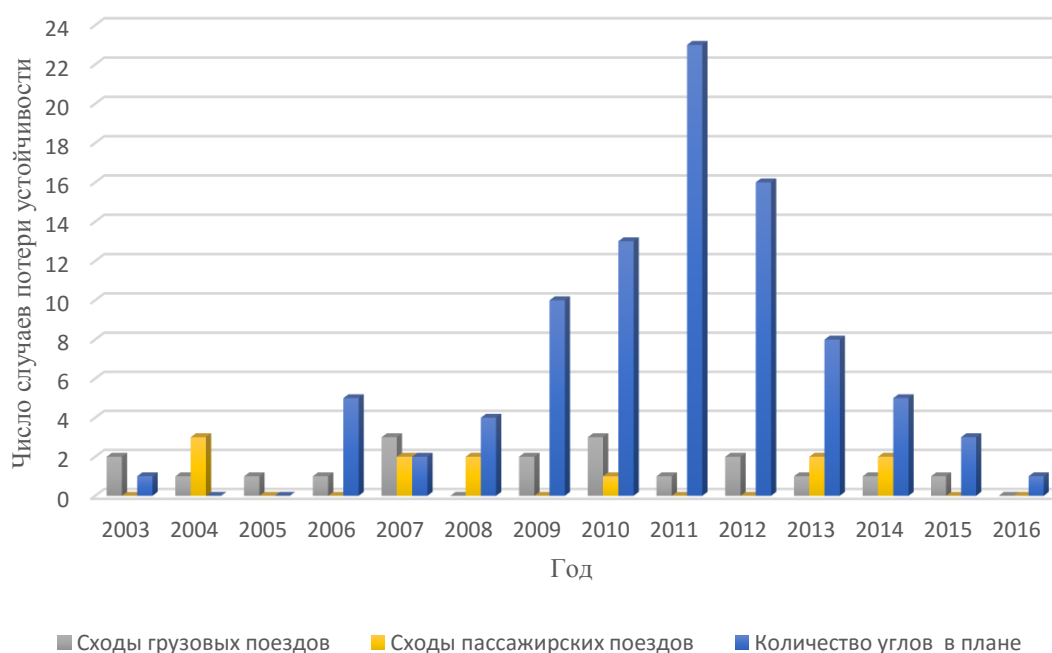


Рис. 1. Распределение числа случаев потери устойчивости бесстыкового пути по годам с учетом типа подвижного состава в России



Рис. 2. График, показывающий связь между случаями выброса, зарегистрированными в странах Европейского союза с 2008 по 2018 г., и глобальным потеплением



Рис. 3. Число происшествий, связанных с температурой рельсовых плетей, в Англии с 2006 по 2013 г.

развернутой длины) и сравнительно мягкий климат, с невысокими максимальными летними температурами, число происшествий с потерей устойчивости рельсовых плетей сопоставимо или выше, чем на железных дорогах России. Максимально допустимая температура закрепления рельсовых плетей на железных дорогах Англии составляет 27 °C [15], она же чаще всего принимается в качестве установленной [16]. При существующем температурном интервале закрепления плетей из-за изменения климата к 2040 г. авторами

[17] прогнозируется увеличение на 40 % ограничений скорости движения поездов.

Причем в современных исследованиях европейских ученых особое внимание уделяется именно вопросам изменения климата и глобального потепления. В Испании был проведен анализ температур воздуха, температур рельсов в разные месяцы и случаев потери устойчивости рельсовых плетей бесстыкового пути, на основе которого выполнено компьютерное моделирование [18]. В результате было получено, что ожидается кратное увеличение

числа случаев температурных изгибов рельсовых плетей. Ежегодное количество деформаций может увеличиться до 20–90 к 2050 г. и до 60–550 к 2075 г. К 2100 г. при существующем росте температур ожидаемое количество выбросов бесстыкового пути может составить более 1 500 (рис. 4) [18].

В связи с этим авторами [18] рекомендуется в качестве простого и эффективного способа повышение температур закрепления рельсовых плетей, а также ограничение скорости движения поездов в период воздействия высоких температур.

Произведем анализ методов определения границ температурного интервала закрепления плетей и расчет с применением приведенных выше формул для четырех железнодорожных станций, расположенных в разных климатических регионах России.

Результаты исследования

Результаты расчетов по разным методикам приведены в табл. 2 и на рис. 5. Проведенный анализ носит информационный характер и ярко иллюстрирует разницу подходов и методик к определению необходимой температуры закрепления, принятых в разных странах. Наибольшими являются температуры закрепления, рассчитанные по методике отраслевого стандарта Китайских железных дорог, по североамериканской методике (AREMA и APTA) и рекомендованные как оптимальные для дорог ОАО «РЖД». Границы температурного интервала, определенные по евростандарту UIC и по методике турецких железных дорог TCDD, существенно ниже, что усугубляет проблему устойчивости рельсовых плетей и существенно повышает количество случаев выброса пути. Авторами [5, 16, 18]

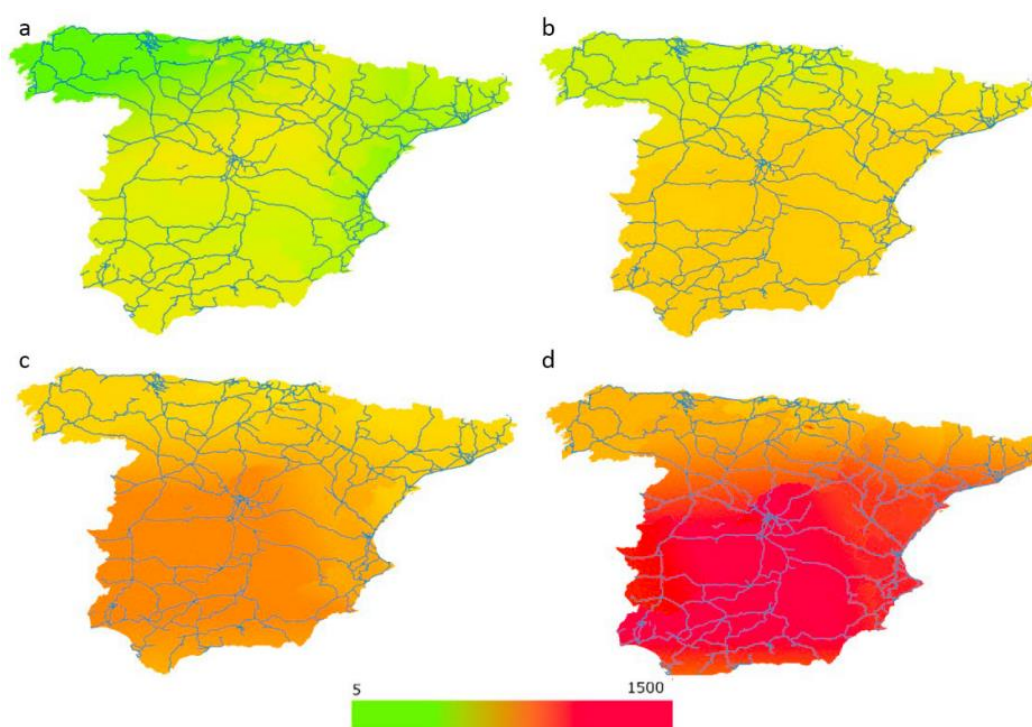


Рис. 4. Прогноз количества случаев потери устойчивости рельсовых плетей на железных дорогах Испании на основе компьютерного моделирования:
a – 2025 г.; b – 2050 г.; c – 2075 г.; d – 2100 г. [18]

Таблица 2

Результаты расчета температурного интервала закрепления плетей, °C

Станции	ОАО «РЖД»			КНР	AREMA и APTA		UIC	TCDD
	min t_3	max t_3	$t_{\text{опт}}$		Minimum D.R.T.	Maximum D.R.T.		
Москва	4	58	30 ± 5	33 ± 5	18	27 ± 15	8 ± 5	13 ± 3
Ростов-на-Дону	6	60	35 ± 5	38 ± 5	23	31 ± 15	14 ± 5	19 ± 3
Челябинск	5	59	30 ± 5	32 ± 5	18	27 ± 15	18 ± 5	13 ± 3
Иркутск	2	53	30 ± 5	28 ± 5	14	23 ± 15	3 ± 5	8 ± 3

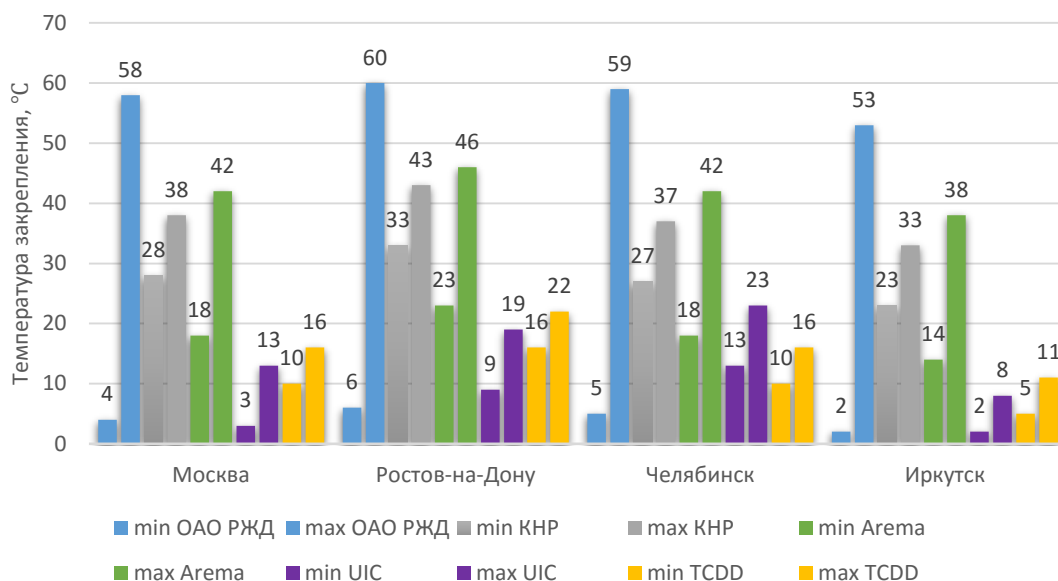


Рис. 5. Интервал температур закрепления рельсовых плетей, определенный по различным методикам для четырех городов России из разных климатических зон

отмечается необходимость повышения в Турции, Англии, Испании и странах Европы в целом минимально допустимой температуры закрепления рельсовых плетей для увеличения их устойчивости в летний период. Анализ границ температурного интервала закрепления плетей в США, определенного по методике AREMA, показывает, что минимально допустимое значение достаточно низкое и также способствует большому числу выбросов бесстыкового пути [13]. Минимальные ($\min t_3$) и максимальные ($\max t_3$) температуры закрепления, рассчитанные по методике ОАО «РЖД», как показывает практика, полностью оторваны от реальности.

Выводы

Основываясь на проведенном анализе, статистике происшествий, а также трудах ведущих ученых мира, предлагаем исключить из приме-

нения расчет температурного интервала закрепления рельсовых плетей по [1], как потерявший научное обоснование и угрожающий безопасности движения поездов, в пользу фиксированных температур закрепления для каждой из дорог в зависимости от климатических условий, с минимальными значениями не ниже 30 °C. Указанное значение минимальной температуры будет обеспечивать устойчивость пути для большинства условий эксплуатации. Также следует отметить, что для уточнения этого порогового значения потребуются обоснование, учитывающее как климатические зоны эксплуатации бесстыкового пути, так и конструкции верхнего строения пути, в том числе и его фактическое состояние. Вместе с усилением контроля, ликвидацией болтовых стыков сваркой это приведет к значительному снижению числа напряженных неровностей и повышению безопасности и бесперебойности движения поездов.

Список источников

1. Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14.12.2016 № 2544р. Москва : ЦентрМАГ, 2025. 176 с.
2. Корниенко Е. В. Особенности напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути при учете воздействия поездов : специальность 05.22.06 «Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Корниенко Елена Владимировна ; Ростовский государственный университет путей сообщения. Ростов-на-Дону, 2019. 145 с.
3. Технические указания по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути : утверждены заместителем министра путей сообщения Российской Федерации Т. В. Семеновым 31 марта 2000 г. Москва : Транспорт, 2000. 96 с.

4. TB 10015–2012. Отраслевой стандарт Китайской Народной Республики. Конструкция железнодорожного бесстыкового пути. Пекин : Китайское железнодорожное издательство, 2013. 130 с.
5. Saltan Mehmet, Ferhat Çeçen, Ömer Faruk Acar. Rail Thermal Buckling Risk Management: Comparative Analysis of Stress-Free Temperature Determination in the USA and Türkiye // 2nd International Symposium on Innovations in Civil Engineering and Technology (ICivilTech 2024) At: Isparta/Türkiye. 2024. URL: https://www.researchgate.net/publication/387655523_Rail_Thermal_Buckling_Risk_Management_Comparative_Analysis_of_Stress-Free_Temperature_Determination_in_the_USA_and_Turkiye (дата обращения: 20.05.2026).
6. AREMA. Stand for Track. American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association. URL: <https://www.railroadfasteners.com/download/AREMA-Stand-for-Track.pdf> (дата обращения: 20.05.2026).
7. APTA RT-FS-S-002-02. Rev. 1. Standard American Public Transportation Association 1300 I Street, NW, Suite 1200 East, Washington, DC 20006 First Published: Sept. 22, 2002. First Revision: April 7, 2017. URL: https://www.apta.com/wp-content/uploads/Standards_Documents/APTA-RT-FS-S-002-02-Rev-1.pdf (дата обращения: 20.05.2026).
8. Устойчивость пути – основное условие безопасности движения / В. И. Новакович, Н. И. Залавский, Г. В. Карпачевский [и др.] // Путь и путевое хозяйство. 2026. № 3. С. 22–25.
9. Об обосновании установленного температурного режима бесстыкового пути / В. И. Новакович, Г. В. Карпачевский, Н. И. Залавский [и др.] // Путь и путевое хозяйство. 2022. № 6. С. 38–40.
10. Пересмотреть инструкцию по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути / В. И. Новакович, Г. В. Карпачевский, Н. И. Залавский [и др.] // Путь и путевое хозяйство. 2023. № 8. С. 32–33.
11. Новакович В. И., Карпачевский Г. В., Залавский Н. И. Обоснование установленного температурного режима работы бесстыкового пути // Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России («ТрансПромЭк-2024») : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию Ростовского государственного университета путей сообщения. Ростов-на-Дону, 2024. С. 197–200.
12. Суслов О. А. Функциональная безопасность эксплуатации бесстыкового пути : специальность 05.22.06 «Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Суслов Олег Александрович ; Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта. Москва, 2017. 241 с.
13. Оценка риска выброса пути // Железные дороги мира. № 8. 2006. С. 76–78.
14. Ferhat Çeçen, Bekir Aktaş. Ray Sıcaklığı Takip Sistemleri (RSTS) için En Uygun Yerlerin Belirlenmesinde Termal Kameralardan Yararlanılması: Hızlı Analiz Metotları Geliştirilmesi // Demiryolu Mühendisliği. 2024. URL: https://www.researchgate.net/publication/382298263_Ray_Sicakligi_Takip_Sistemleri_RSTS_icin_En_Uygun_Yerlerin_Belirlenmesinde_Termal_Kameralardan_Yararlanilmasi_Hizli_Analiz_Metotlari_Gelistirilmesi_Use_of_Thermal_Imaging_Cameras_to_Identify_Best_Loca (дата обращения: 20.05.2026).
15. Heat-Related Failures on Southeast England's Railway Network: Insights and Implications for Heat Risk Management / Emma Ferranti, Lee Chapman, Caroline Lowe [et al.] // Weather, Climate, and Society. 2016. URL: https://www.researchgate.net/publication/294723085_Heat-Related_Failures_on_Southeast_England's_Railway_Network_Insights_and_Implications_for_Heat_Risk_Management (дата обращения: 20.05.2026).
16. Quantifying the effects of high summer temperatures due to climate change on buckling and rail related delays in south-east United Kingdom / K. Dobney, C. Baker, Andrew Quinn, Lee Chapman // Meteorological Applications. 2009. URL: https://www.researchgate.net/publication/230320048_Quantifying_the_effects_of_high_summer_temperatures_due_to_climate_change_on_buckling_and_rail_related_delays_in_south-east_United_Kingdom (дата обращения: 20.05.2026).
17. Future projections of temperature-related climate change impacts on the railway network of Great Britain / Erika Palin, Hazel Thornton, Camilla Mathison [et al.] // Climatic Change. 2013. URL: https://www.researchgate.net/publication/257548222_Future_projections_of_temperature-related_climate_change_impacts_on_the_railway_network_of_Great_Britain (дата обращения: 20.05.2026).
18. Risk of increasing temperature due to climate change on operation of the Spanish rail network / Ignacio Villalba, Ricardo Franco, Pablo Salvador Zuriaga, Pablo Fernández Martínez // Transportation Research Procedia. 2020. URL: https://www.researchgate.net/publication/340072112_Risk_of_increasing_temperature_due_to_climate_change_on_operation_of_the_Spanish_rail_network (дата обращения: 20.05.2026).

References

1. Instructions for the installation, installation, maintenance and repair of a continuously welded track. Approved by the Order of Russian Railways dated 14.12.2016 No. 2544r. Moscow: TsentrMag; 2025. 176 p. (In Russ.).
2. Kornienko E. V. Features of the stress-strain state of a continuously welded track when taking into account the effects of trains. Specialty 05.22.06 'Railway track, railway survey and design: dissertation for the degree of Candidate of Engineering; Rostov State Transport University. Rostov-on-Don; 2019. 145 p. (In Russ.).
3. Technical instructions for the installation, installation, maintenance and repair of a continuously welded track. Moscow: Transport; 2000. 96 p. (In Russ.).
4. TB 10015-2012. The industry standard of the People's Republic of China. The construction of a continuously welded track. Beijing: Chinese Railway Publishing House; 2013. 130 p. (In Russ.).
5. Saltan Mehmet, Ferhat Çeçen, Ömer Faruk Acar. Rail Thermal Buckling Risk Management: Comparative Analysis of Stress-Free Temperature Determination in the USA and Türkiye. *2nd International Symposium on Innovations in Civil Engineering and Technology (ICivilTech 2024)* At: Isparta/Türkiye. 2024. URL: https://www.researchgate.net/publication/387655523_Rail_Thermal_Buckling_Risk_Management_Comparative_Analysis_of_Stress-Free_Temperature_Determination_in_the_USA_and_Turkiye.
6. AREMA. Stand for Track. American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association. URL: <https://www.railroadfasteners.com/download/AREMA-Stand-for-Track.pdf>.
7. APTA RT-FS-S-002-02, Rev. 1. Standard American Public Transportation Association 1300 I Street, NW, Suite 1200 East, Washington, DC 20006 First Published: Sept. 22, 2002. First Revision: April 7, 2017. URL: https://www.apta.com/wp-content/uploads/Standards_Documents/APTA-RT-FS-S-002-02-Rev-1.pdf.
8. Novakovich V. I., Zalavsky N. I., Karpachevsky G. V. [et al.]. Stability of the track is the main condition for traffic safety. *Track and Track Facilities*. 2026;(3):22–25. (In Russ.).
9. Novakovich V. I., Karpachevsky G. V., Zalavsky N. I. [et al.]. On the justification of the established temperature regime of a continuously welded track. *Track and Track Facilities*. 2022;(6):38–40. (In Russ.).
10. Novakovich V. I., Karpachevsky G. V., Zalavsky N. I. [et al.]. To revise the instructions for the installation, laying, maintenance and repair of a continuously welded track. *Track and Track Facilities*. 2023;(8):32–33. (In Russ.).
11. Novakovich V. I., Karpachevsky G. V., Zalavsky N. I. Justification of the established temperature regime for the operation of a continuously welded track. *Actual Problems and Prospects for the Development of Transport, Industry and the Economy of Russia (TransPromEk-2024). Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 95th anniversary of the Rostov State Transport University*. Rostov-on-Don; 2024. P. 197–200. (In Russ.).
12. Suslov O. A. Functional continuously welded track safety operation. Specialty 05.22.06 'Railway track, survey and design of railways': dissertation for the degree of Doctor of Engineering; Scientific Research Institute of Railway Transport. Moscow; 2017. 241 p. (In Russ.).
13. Assessment of pathway release risk. *Railways of the World*. 2006;(8):76–78. (In Russ.).
14. Ferhat Çeçen, Bekir Aktaş. Ray Sıcaklığı Takip Sistemleri (RSTS) için En Uygun Yerlerin Belirlenmesinde Termal Kameralardan Yararlanılması: Hızlı Analiz Metotları Geliştirilmesi. *Demiryolu Mühendisliği*. 2024. URL: https://www.researchgate.net/publication/382298263_Ray_Sicakligi_Takip_Sistemleri_RSTS_icin_En_Uygun_Yerlerin_Belirlenmesinde_Termal_Kameralardan_Yararlanilmasi_Hizli_Analiz_Metotlari_Gelistirilmesi_Use_of_Thermal_Imaging_Cameras_to_Identify_Best_Loca.
15. Ferranti Emma, Chapman Lee, Lowe Caroline, McCulloch Steve, Jaroszweski David, Quinn Andrew. Heat-Related Failures on Southeast England's Railway Network: Insights and Implications for Heat Risk Management. *Weather, Climate, and Society*. 2016. URL: https://www.researchgate.net/publication/294723085_Heat-Related_Failures_on_Southeast_England's_Railway_Network_Insights_and_Implications_for_Heat_Risk_Management.
16. Dobney K., Baker C., Quinn Andrew, Chapman Lee. Quantifying the effects of high summer temperatures due to climate change on buckling and rail related delays in south-east United Kingdom. *Meteorological Applications*. 2009. URL: https://www.researchgate.net/publication/230320048_Quantifying_the_effects_of_high_summer_temperatures_due_to_climate_change_on_buckling_and_rail_related_delays_in_south-east_United_Kingdom.
17. Palin Erika, Thornton Hazel, Mathison Camilla [et al.]. Future projections of temperature-related climate change impacts on the railway network of Great Britain. *Climatic Change*. 2013. URL: https://www.researchgate.net/publication/257548222_Future_projections_of_temperature-related_climate_change_impacts_on_the_railway_network_of_Great_Britain.
18. Villalba Ignacio, Franco Ricardo, Salvador Zuriaga, Pablo Martínez Fernández. Risk of increasing temperature due to climate change on operation of the Spanish rail network. *Transportation Research Procedia*. 2020. URL: https://www.researchgate.net/publication/340072112_Risk_of_increasing_temperature_due_to_climate_change_on_operation_of_the_Spanish_rail_network.

Информация об авторах

В. Л. Шаповалов – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Путь и путевое хозяйство» Ростовского государственного университета путей сообщения.

Е. В. Мироненко – кандидат технических наук, доцент кафедры «Путь и путевое хозяйство» Ростовского государственного университета путей сообщения.

Е. В. Корниенко – кандидат технических наук, доцент кафедры «Путь и путевое хозяйство» Ростовского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

V. L. Shapovalov – Doctor of Engineering, Head of the Track and Track Facilities Department, Rostov State Transport University.

E. V. Mironenko – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Track and Track Facilities Department, Rostov State Transport University.

E. V. Kornienko – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Track and Track Facilities Department, Rostov State Transport University.

Статья поступила в редакцию 18.05.2026; одобрена после рецензирования 06.07.2026; принята к публикации 03.09.2026.

The article was submitted 18.05.2026; approved after reviewing 06.07.2026; accepted for publication 03.09.2026.

Научная статья
УДК 658.513.3
doi:10.52170/1815-9265_2026_80_85

Сущность оценки качества работ путевых и снегоборочных машин

Андрей Дмитриевич Абрамов¹, Алексей Леонидович Манаков², Виктор Иванович Кочергин³,
Михаил Андреевич Семенов⁴✉

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

¹ abramov@stu.ru

² rectorat@sgups.stu.ru

³ vkplus2011@yandex.ru

⁴ MikeSemenov13111996@yandex.ru✉

Аннотация. В дистанциях пути, механизированных дистанциях пути и путевых механизированных станциях ОАО «РЖД» практически нет разработок по системе управления качеством выполняемых работ, а ведь именно это является одной из важнейших проблем в бесперебойном и безаварийном функционировании железных дорог. Предлагается сформулировать термин «качество» применительно к работе путевых и снегоборочных машин, тем более что с 2022 г. изменились формулировки в Инструкции по снегоборке. Оценка качества работ путевых машин осуществляется на основании Инструкции по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения поездов после выполнения всех работ, что приводит к увеличению сроков работ при неудовлетворительной оценке. Отрицательных аспектов можно избежать, если определить понятие «качество» в целом для всех технологических процессов, выполняемых дистанцией пути, механизированными дистанциями пути и путевыми механизированными станциями.

Процесс обслуживания и ремонта путей является непрерывным, и по мере мониторинга информации, получаемой в результате осуществления контроля, в ходе решения задач обеспечения качества работ может потребоваться внесение корректировок, что составляет суть оперативного управления качеством.

СГУПС предлагает методики и инструментальный для промежуточного мониторинга и регистрации результатов работ по автоматическому контролю качества уплотнения балластного слоя рельсового пути и устройство для его осуществления, прибор и программное обеспечение для измерения несущей способности, а также алгоритм для контроля эффективности работы снегоборочных машин.

Специфика работы ОАО «РЖД» подразумевает постоянное обеспечение качества выполняемых работ, иначе это может привести к значительным материальным затратам и человеческим жертвам, поэтому улучшение качества в холдинге предполагает сохранность рабочего состояния техники, экономию топлива, сокращение времени занятия путей.

Ключевые слова: оценка качества работ, путевые и снегоборочные машины, система управления качеством, петля качества, обеспечение качества работ

Для цитирования: Сущность оценки качества работ путевых и снегоборочных машин / А. Д. Абрамов, А. Л. Манаков, В. И. Кочергин, М. А. Семенов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 3 (80). С. 85–92. DOI 10.52170/1815-9265_2026_80_85.

Original article

The essence of performance assessment of track maintenance and snow removal machines

Andrey D. Abramov¹, Alexey L. Manakov², Victor I. Kochergin³, Mikhail A. Semenov⁴✉

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

¹ abramov@stu.ru

² rectorat@sgups.stu.ru

³ vkplus2011@yandex.ru

⁴ MikeSemenov13111996@yandex.ru✉

Abstract. In the track sections, mechanized track sections, and track mechanized stations of Russian Railways, there are practically no developments in the quality management system for the work performed, although the quality of work is one of the most important problems in the smooth and trouble-free operation of railways. Therefore,

it is necessary to define the term 'quality' as it applies to the work of track and snow removal machines. This is especially true given that the wording in the Snow Removal Instructions has changed since 2022. Track machine performance is assessed based on the Instructions for Assessing Track Condition with Track Measuring Instruments and Measures to Ensure Train Traffic Safety after completion of all work, which leads to increased work time if the assessment is unsatisfactory. Negative aspects can be avoided by defining the concept of 'quality' in a comprehensive manner for all technological processes performed by track departments, mechanized track departments, and track mechanized stations.

Track maintenance and repair is a continuous process, and as the information obtained from monitoring is monitored, adjustments may be required to ensure quality, which is the essence of operational quality management.

STU offers methods and tools for interim monitoring and recording of work results for automatic quality control of track ballast compaction, a device for implementing this, a device and software for measuring bearing capacity, and an algorithm for monitoring the efficiency of snow removal machines.

The specific operational nature of Russian Railways requires constant quality assurance, as even the slightest indication of non-compliance can lead to significant material and human losses. Therefore, improving quality within the holding company entails maintaining equipment in good working order, fuel savings, technology compliance, and reducing track occupancy time.

Keywords: performance assessment, track maintenance and snow removal machines, Quality Management System, Quality Loop, work quality assurance

For citation: Abramov A. D., Manakov A. L., Kochergin V. I., Semenov M. A. The essence of performance assessment of track maintenance and snow removal machines. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(80):85–92. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_80_85.

Введение

Оценка качества выполняемых работ в ОАО «РЖД» является одной из важнейших проблем в бесперебойном и безаварийном функционировании железных дорог. Как ни странно, в подразделениях Российских железных дорог практически нет четких методических указаний по системе управления качеством работ, выполняемых в дистанциях пути, механизированных дистанциях пути и путевых механизированных станциях.

Существует множество разнообразных аспектов понятия «качество». Чтобы наиболее точно отразить требования концепции управления качеством и его оценки применительно к работам, осуществляемым в подразделениях ОАО «РЖД», были проанализированы все подходы к определению данного понятия и отсортированы лишь те, которые подходят к специфике работ дистанций пути, механизированным дистанциям пути и путевым механизированным станциям.

В настоящее время, в соответствии с Инструкцией по снегоборьбе на железных дорогах Российской Федерации [1], введенной с 01.07.2022, решение о необходимости очистки путей от снега и контроль за выполнением мероприятий осуществляют руководители подразделений, без указания требований к очистке и способов оценки качества в правоустанавливающих документах.

Оценка качества работ путевых машин осуществляется методом визуального осмотра и проверки геометрии расположения пути измерительными шаблонами руководителем работ с

последующим проездом вагона-путеизмерителя, а затем по результатам измерения выполняется анализ полученных результатов по балльной шкале в соответствии с Инструкцией № 436/р [2]. В Инструкции приводятся параметры оценки степеней отступлений от норм содержания рельсовой колеи.

В разд. 11 Инструкции приведена количественная и качественная оценка для километров, участков и дистанций, по которой и определяется качество работы подразделений. При неудовлетворительной оценке проведенных работ принимаются меры по устранению выявленных дефектов, что приводит к увеличению затрат на выполнение работ, снижению пропускной способности участка с дефектами, сбоем графика выполнения работ выпровочно-подбивочно-рихтовочных машин из-за необходимости повторных работ. Отрицательных аспектов можно избежать, если определить понятие «качество» в целом для всех технологических процессов, выполняемых дистанцией пути, механизированными дистанциями пути и путевыми механизированными станциями.

При оценке качества выполнения работ по подбивке и выправке пути и уборке снега с пути следует исключить человеческий фактор, приблизительное оценивание. Для этого необходимо обеспечить исполнителей четкими требованиями к соответствию качества и приборами для промежуточного контроля проделанной работы, что позволит автоматизировать процесс оценки качества и внесения результатов в автоматизированную систему

управления производственными активами – АСУ ПА ЦДИ.

Материалы и методы исследования

Современные определения понятия «качество» принято объединять в шесть групп [3]. Для работ, выполняемых дистанцией пути, механизированными дистанциями пути и путевыми механизированными станциями, качество можем рассматривать как:

- 1) оценку объема убранного снега или длины очищенных от снега путей, выраженную в единицах измерения, с учетом времени и конкретных условий; оценку количества уплотненных шпал, длины стабилизированного пути; оценку уплотнения балласта;
- 2) результативность процесса;
- 3) соответствие стандартам и нормативам;
- 4) уровень удовлетворения запросов потребителей.

В настоящее время специалисты связывают понятие «качество» с удовлетворением ожиданий и запросов потребителей в отношении услуги (работы). Качество оценивается потребителем и должно быть поставлено в зависимость от его нужд и пожеланий. Такой подход закреплен в международных стандартах ИСО серии 9000: «качество – степень,

с которой совокупность собственных характеристик объекта выполняет требования» [4].

Основные понятия, относящиеся к качеству очистки путей от снега и ремонта пути, в соответствии с версией международных стандартов приведены на рис. 1 [5]. Применительно к процессу очистки путей от снега и ремонта пути качество работ – мера соответствия процесса и результата требованиям потребителей или нормативам, если таковые есть.

Рассмотрение качества в соответствии запросам и нуждам потребителей отражает социально-управленческий подход, следовательно, обеспечение качества – это процесс, которым можно управлять. Управление качеством – базовый термин, а остальные понятия являются его составляющими (рис. 2). Содержание процесса управления качеством можно изобразить в виде схемы (рис. 3) [5].

Концепции управления качеством предлагают широкий спектр принципов, соблюдение которых позволит организации достичь поставленных целей: ориентация на потребителя, вовлечение работников, процессный подход, системный подход, постоянное улучшение, принятие решений, основанное на фактах.

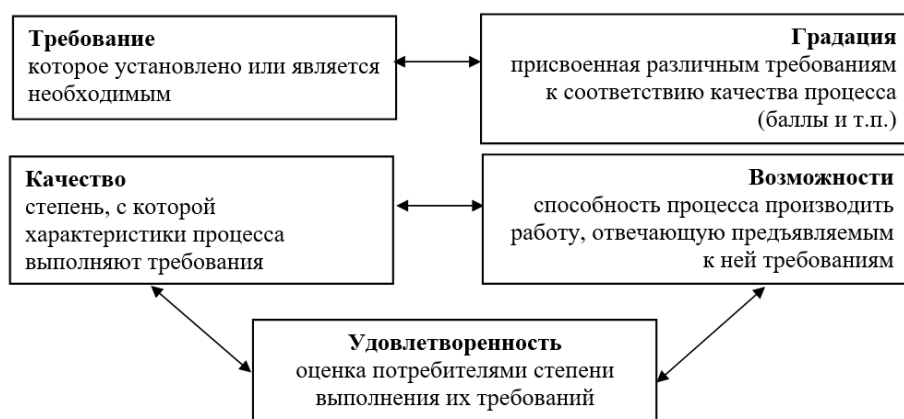


Рис. 1. Характеристики качества

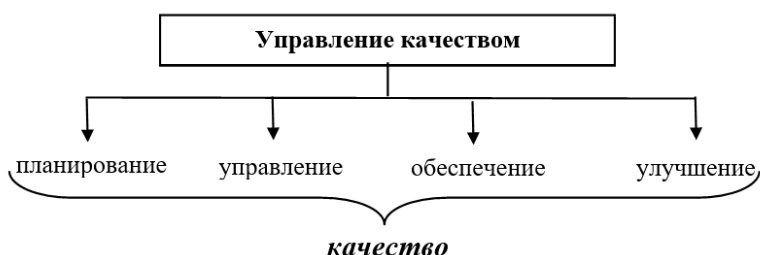


Рис. 2. Составляющие управления качеством

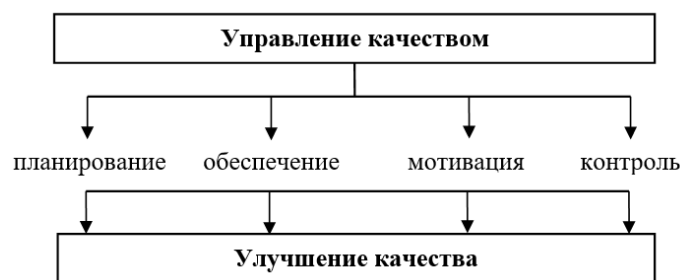


Рис. 3. Взаимосвязь составляющих управления качеством

Ранее сотрудниками Сибирского государственного университета путей сообщения проводились работы по определению качества уплотнения балласта. Был предложен метод контроля плотности щебеночного балласта железнодорожного пути, основанный на регистрации ускорения поверхности балластного слоя при воздействии на него переменной динамической силой, который может быть реализован в автоматизированном режиме с помощью навесного специализированного оборудования для путевой машины Duomatic [6].

Также усовершенствован способ автоматического контроля качества уплотнения балластного слоя рельсового пути и запатентовано устройство для его осуществления, устанавливаемое на динамический стабилизатор пути [7]. Кроме этого, разработан и изготовлен прибор для измерения несущей способности строительного материала и непосредственного балластного слоя. Прибор приспособлен для применения на железнодорожном транспорте и относится к приборам для замера плотности щебеночного основания с возможностью оценки равномерности уплотнения железнодорожного пути [8]. Разработано программное обеспечение «Балласт-1М» для измерения несущей способности строительных материалов при помощи замера ускорения прибора при ударном воздействии. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: фиксация и расчет ускорений ударного воздействия на щебеночный балласт, сохранение результатов испытаний [9].

Данные системы или уже установлены на незначительное количество путевых машин или проходят испытания для последующей оснастки всего парка путевых машин, а мобильные устройства будут предоставлены руководителям работ – это позволит обеспечить контроль качества выполнения работ на всех этапах проведения капитального и среднего

ремонта железнодорожного пути, что, в свою очередь, частично снимет ответственность с руководителей работ, осуществляющих приемку выполненных работ, и позволит предотвратить неудовлетворительные оценки, составляемые по результатам контрольно-измерительных проездов.

В работе по очистке снега на железнодорожном пути задействуются снегоуборочные машины СМ, ПСС, СДПМ, ПОМ и их модификации. В настоящее время оценка качества выполнения работ и необходимости очистки путей от снега определяется руководителями станций и соответствующих подразделений, расположенных на этих станциях, т. е. человеческим фактором. Ранее в Инструкции по подготовке к работе в зимний период от 22 октября 2013 г. № 2243р были представлены метеорологические явления и действия, которые должны быть обязательно произведены при их возникновении, также были расписаны критерии необходимости отправления в работу машин, что позволяло руководителю, соблюдая требования данного документа, эффективно эксплуатировать снегоуборочные машины. В настоящее время действует другая Инструкция по подготовке к работе в зимний период, вступившая в силу 01.07.2022 № 1733 [1], в ней отсутствует перечень критериев, необходимых для определения качественной уборки железнодорожного пути. Теперь непосредственное решение о необходимости работ принимает руководитель станции и соответствующих подразделений, что привело к снижению эффективности эксплуатации снегоуборочной техники.

Ранее проводились работы по внедрению автоматизированной системы контроля работы специального подвижного состава (АС КРСПС) для оценки эффективности работы снегоуборочных машин, а именно СМ и ПСС. На ее

основании был проведен анализ работы снегоуборочных машин СМ (так как их парк был самым многочисленным на момент проведения работ в 2019–2021 гг. [10]), который показал, что оценивание качества выполнения работ, которое ранее производилось на основании приблизительной оценки бригадой машины количества кубометров убранного снега за смену, было не эффективно. Внедрение системы АС КРСПС позволило предложить более эффективный показатель оценивания качества работ снегоуборочных машин СМ – количество метров очищенного за смену от снега железнодорожного пути. Кроме того, сопоставление показаний количества убранного снега в кубометрах и длины очищенных путей может свидетельствовать о необоснованном применении машины.

По результатам анализа работы машин на основе конкретного предприятия были разработаны эмпирические формулы, позволяющие определить значение показателя за год:

$$L_{\text{год}} = 276\,110 + 9,81V_c + 452,66t_{\text{р.п}} - 9\,001\,365,32h, \quad (1)$$

и за смену:

$$L_{\text{смена}} = 3\,005,3 + 11,54V_c + 139,57t_{\text{р.п}} - 87\,950,27h, \quad (2)$$

где V_c – объем убранного снега, м^3 ; $t_{\text{р.п}}$ – время нахождения машины в рабочем режиме, ч; h – высота снежного покрова, м.

Задействованные в данных формулах показатели позволили на тот момент подтвердить эффективность работы машин с вероятностью 90 % [11].

Проведя анализ работы снегоуборочных машин, указанных выше, за последние пять лет, можно сделать вывод, что подход, примененный при выводе эмпирических формул, был правильным, но в связи с нестабильностью погодных условий и устареванием машин формулы необходимо корректировать по окончании сезона работ и при получении долгосрочного прогноза на зимний период.

Скорректированная формула за год по результатам работы зимой 2025–2026 г. примет вид

$$L_{\text{год}} = 118\,283,6 + 26,2V_c + 428,7t_{\text{р.п}} - 9\,619\,163,9h. \quad (3)$$

Данная формула позволила выполнить анализ качества работы снегоуборочных машин СМ по предприятию за зиму 2025/26 г. и составить прогноз работы машин на следующую зиму. Проведенный анализ работы снегоуборочных машин за 2019–2021 гг. и за

2022–2026 гг. выявил одну и ту же закономерность. Но погрешность выполнения работ изменилась: в раннем периоде на одном предприятии она составляла не более 10 %, на одной станции – не более 3 %, а в более позднем разброс увеличился на одном предприятии до 30 %, на одной станции погрешность также выросла. Данные расхождения можно связать с ранее упомянутой Инструкцией [1], вступившей в силу как раз в 2022 г., в которой вся ответственность за уборку станции и эффективность работы машин возложена на плечи руководящего состава, что вне компетенции последних (отсутствуют аргументы о необходимости уборки/неуборки снега с пути), а это может привести к избыточному использованию машин, когда снегоуборочная машина убирает снег высотой не более 2 см, что в Инструкции 2013 г. не допускалось.

В настоящее время за контроль качества выполненных работ в зимний период ответственен мастер участка, который непосредственно руководит работой машины, также возможен визуальный контроль параметров через систему АС КРСПС, но данные оценки имеют субъективный характер. Анализ данных программы АС КРСПС с применением разработанных эмпирических формул позволит получить ориентир, на основании которого можно оценить качество уборки и проанализировать эффективность использования снегоуборочных машин руководителем подразделения.

Стратегия предприятия в процессе управления качеством должна реализовываться на основе надежной и достоверной информации, обеспечивающей эффективность управленческих решений в процессе очистки путей от снега, реализации стандартов и нормативных актов. Такая информация формируется в разных категориях: качество результата процесса, качество самого процесса и качество деятельности подразделения.

Используя международный опыт в системном управлении качеством процессов, можно сделать заключение, что единая система управления качеством процесса работы снегоочистительной техники и техники по ремонту пути должна подразделяться на две подсистемы управления качеством – процесса и результата. И если подсистема управления качеством результата работ, выполняемых в подразделениях, работает, то подсистема управ-

ления качеством процесса требует корректировки.

Система управления качеством состоит из трех стадий непрерывного цикла: проектирования, обеспечения и мониторинга качества работ. Здесь проектирование качества – это нормативы, которым надо соответствовать; обеспечение качества – соблюдение технологий выполняемых работ; мониторинг – проверка промежуточных результатов с целью недопущения дефектов и аварийных условий.

Результаты исследования

Опыт показывает, что качественная работа может быть выполнена лишь с учетом комплексного исследования запросов потребителей, что иллюстрируется петлей качества – моделью последовательно взаимосвязанных видов деятельности, обеспечивающих качество процесса, в данном случае – работ по очистке путей от снега и работ по ремонту пути на различных этапах модели. Петля качества, составленная для процесса очистки путей от снега, представлена на рис. 4 и состоит из следующих элементов:

1) начало нового сезона по подготовке процесса очистки путей от снега – до 10 апреля проводится анализ работы за прошедший зимний период;

2) разработка плана капитального и среднего ремонта снегоуборочной техники – до 25 апреля;

3) изучение прогнозов по объему предстоящих работ, срокам их начала, уточнение маршрутов. Организация рабочих групп в структурных подразделениях ОАО «РЖД» для оказания помощи и контроля за ходом подготовки к работе в зимних условиях – до 1 июня;

4) подготовка и утверждение комплекса мероприятий по приведению технических средств и технологического оборудования для работы в зимних условиях – до 1 июня. Организуется ремонт снегоуборочной и снегоочистительной техники в соответствии с утвержденным графиком;

5) материально-техническое обеспечение. Разработка мероприятий по подготовке хозяйства к предстоящему зимнему периоду: определяется потребность в машинах, локомотивах, подвижном составе, инвентаре и рабочей силе из расчета очистки и уборки снега со всей железнодорожной станции в установленный срок, планы обеспечения запасом топлива и другими расходными материалами – до 1 июля. Готовность распорядительных документов об образовании рабочих групп и плановых заданий – до 5 июля;

6) кадровое обеспечение: определение требований к уровню исполнителей работ, мониторинг набранного контингента, укомплектованность штата. «Первозимники» должны приступить к обучению не позднее 15 июля и завершить его до 15 октября. Формирование аварийно-восстановительных бригад – до 1 сентября;

7) разработка нормативных актов по осуществлению процесса очистки. Пробный выезд снегоуборочной техники. Готовность плана по снегоборьбе, плана-графика пробных поездок снегоочистителей плужных по закрепленным участкам с целью проверки габарита – до 20 сентября. До 15 октября каждое место выгрузки снега должно быть обозначено работниками дистанции пути;

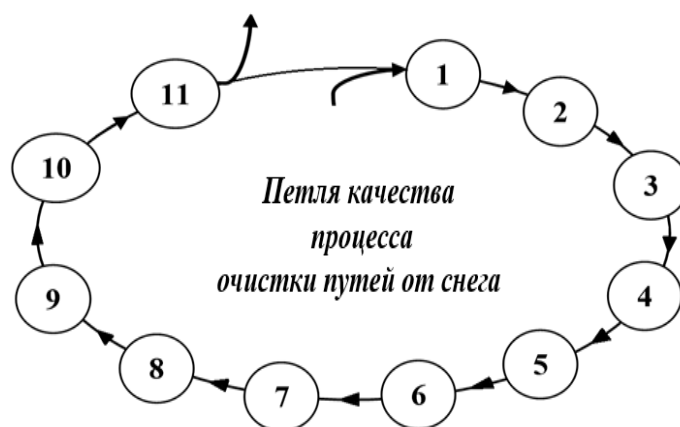


Рис. 4. Модель петли качества процесса очистки путей от снега

8) готовность к работе в зимний период. Завершение всех работ, связанных с подготовкой к работе в зимний период. Выдача свидетельства о готовности к работе в зимний период на железных дорогах первой группы – до 15 октября;

9) работы по очистке путей от снега;

10) контроль качества выполняемых работ, мониторинг профессиональной деятельности работников;

11) начало нового цикла (витка петли качества) работ по очистке путей от снега.

Если на петлю качества по процессу очистки путей от снега наложить стадии непрерывного цикла управления качеством, то получим интегральную модель управления качеством процесса снегоуборки.

Взаимодействие двух последовательных циклов является эффективным в том случае, если после каждого из них петля качества выполненных работ превращается в восходящую спираль, выходящую на новый уровень, закручивающуюся вокруг вектора повышения качества [4].

Контроль над работой специальной техники заключается в постоянном мониторинге измерений, происходящих на путях. Так как процесс

обслуживания и ремонта путей является непрерывным, то по мере поступления новой информации, получаемой в результате осуществления контроля, может потребоваться внесение корректирующих воздействий, что составляет суть оперативного управления.

Выводы

Специфика работы ОАО «РЖД» подразумевает постоянное обеспечение качества выполняемых работ, иначе это может привести к значительным материальным затратам и человеческим жертвам, поэтому улучшение качества в холдинге предполагает сохранность рабочего состояния техники, экономию топлива, соответствие технологии, сокращение времени занятия путей, но не в ущерб качеству. То есть для ОАО «РЖД» улучшение качества работ – оптимизация технологических процессов, бережливое производство и т. п. Если же не будет прогрессивного продвижения, то восходящая спираль превратится в плоскую петлю, а это будет свидетельствовать о холостых оборотах цикла управления качеством, которые не ведут к улучшению качества конечного результата – бережливому производству и росту трудового потенциала работников.

Список источников

1. Инструкция по подготовке к работе в зимний период и организации снегоборьбы в филиалах и дочерних обществах ОАО «РЖД»: утверждена распоряжением ОАО «РЖД» 01.07.2022 № 1733р : (ред. от 10.03.2025 № 546). Москва, 2022. 126 с.
2. Инструкция по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения поездов : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» 28.02.2020 № 436р. Москва, 2020. 85 с.
3. Новиков А. М., Новиков Д. А. Методология. Москва : Синтег, 2007. 668 с.
4. Салимова Т. А. Управление качеством : учебник по специальности «Менеджмент организации». Москва : Омега-Л, 2010. 416 с.
5. Новиков Д. А. Структура теории управления социально-экономическими системами // Управление большими системами. 2009. № 24. С. 216–257.
6. Коларж С. А. Повышение качества контроля организационно-технологических процессов уплотнения щебеночного балласта при производстве путевых ремонтно-восстановительных работ : специальность 05.02.22 «Организация производства (транспорт) (технические науки)» : автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук / Коларж Сергей Александрович ; Сибирский государственный университет путей сообщения. Новосибирск, 2019. 24 с.
7. The Stabilization Control of the Railroad Track / A. Manakov, A. Abramov, A. Ilinykh [et al.] // Transportation Research Procedia. 2022. Vol. 61 (3). P. 681–690.
8. Патент № 2766826 РФ, МПК E02D 1/02, G01N 3/30. Прибор для измерения несущей способности строительного материала : № 2021103699 : заявл. 12.02.2021 : опубл. 16.03.2022 / Бехер С. А., Ильиных А. С., Игумнов А. А., Воронцов Д. С., Коларж С. А. ; заявитель и правообладатель Сибирский государственный университет путей сообщения.
9. Патент № 2121613337 РФ. Мобильное приложение «Балласт-1М» : № 2021612332 : заявл. 20.05.2021 : опубл. 05.03.2021 / Бехер С. А., Игумнов А. А., Коларж С. А., Ульяничев И. С. ; заявитель и правообладатель Сибирский государственный университет путей сообщения.
10. Абрамов А. Д., Семенов М. А. Повышение эффективности работы снегоуборочной машины типа СМ на основе автоматизированного мониторинга // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2021. № 3 (58). С. 40–49.

11. Абрамов А. Д., Семенов М. А. Повышение эффективности рабочего процесса уборки снега от внедрения мероприятий по оптимизации структуры затрат // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2022. № 2 (54). С. 117–127.

References

1. Instructions for preparation for work in the winter period and organization of snow control in branches and subsidiaries of Russian Railways: approved by order of Russian Railways dated 01.07.2022 No. 1733r (as amended on 10.03.2025 No. 546). Moscow; 2022. 126 p. (In Russ.).
2. Instructions for assessing the condition of the track gauge using track measuring equipment and measures to ensure the safety of train traffic: approved by the order of Russian Railways dated 28.02.2020 No. 436r. Moscow; 2020. 85 p. (In Russ.).
3. Novikov A. M., Novikov D. A. Methodology. Moscow: Sinteg; 2007. 668 p. (In Russ.).
4. Salimova T. A. Quality Management: A Textbook on the Specialty 'Organization Management'. Moscow: Omega-L; 2010. 416 p. (In Russ.).
5. Novikov D. A. Structure of the theory of socio-economic systems management. *Large Systems Management*. 2009;(24):216–257. (In Russ.).
6. Kolarzh S. A. Improving the organizational and technological processes quality control for compacting crushed stone ballast during track repair and restoration work. Specialty 05.02.22 'Organization of Production (Transport) (Engineering Sciences)' abstract for the degree of Candidate of Engineering; Siberian Transport University. Novosibirsk; 2019. 24 p. (In Russ.).
7. Manakov A., Abramov A., Ilinykh A., Bekher S., Igumnov A., Kolarzh S. The Stabilization control of the railroad track. *Transportation Research Procedia*. 2022;61(3):681–690.
8. Russian Federation Patent No. 2766826, IPC E02D 1/02, G01N 3/30. Device for measuring the bearing capacity of building materials / Bekher S. A., Ilinykh A. S., Igumnov A. A., Vorontsov D. S., Kolarzh S. A.; applicant and copyright holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education 'Siberian Transport University' (STU) (RU); No. 2021103699; declared 12.02.2021 published 16.03.2022. (In Russ.).
9. Russian Federation Patent No. 2121613337. Mobile application 'Ballast-1M' / Bekher S. A., Igumnov A. A., Kolarzh S. A., Ulyanchev I. S.; applicant and copyright holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education 'Siberian Transport University' (STU) (RU); No. 2021612332; declared 20.05.2021; published 05.03.2021. (In Russ.).
10. Abramov A. D., Semenov M. A. Improving the efficiency of the SM-type snow removal machine based on automated monitoring. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2021;(58):40–49. (In Russ.).
11. Abramov A. D., Semenov M. A. Improving the efficiency of the snow removal workflow by implementing measures to optimize the cost structure. *Bulletin of the Ural State Transport University*. 2022;(54):117–127. (In Russ.).

Информация об авторах

А. Д. Абрамов – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» Сибирского государственного университета путей сообщения.

А. Л. Манаков – доктор технических наук, доцент, ректор Сибирского государственного университета путей сообщения.

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

М. А. Семенов – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Подъемно-транспортные, путевые, строительные и дорожные машины» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

A. D. Abramov – Doctor of Engineering, Professor of the Technology of Transport Engineering and Machine Operation Department, Siberian Transport University.

A. L. Manakov – Doctor of Engineering, Associate Professor, Rector of the Siberian Transport University.

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

M. A. Semenov – Candidate of Engineering, Senior Lecturer of the Lifting, Transport, Track, Construction and Road Building Machinery Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 01.07.2026; одобрена после рецензирования 10.09.2026; принята к публикации 11.09.2026.

The article was submitted 01.07.2026; approved after reviewing 10.09.2026; accepted for publication 11.09.2026.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 624.15

doi:10.52170/1815-9265_2026_80_93

Об эффекте снижения осадки при дискретизации фундамента

Владимир Евгеньевич Козловский¹, Иван Михайлович Смирнов²✉

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

¹koslovskii@mail.ru

²sm.ivan00@gmail.com✉

Аннотация. При проектировании и эксплуатации опор воздушных линий электропередачи в сложных геологических условиях, таких как вечномёрзлые (многолетне-мерзлые) грунты, необходимо уделять особое внимание конструкции фундамента. Большинство фундаментов, устроенных в зонах распространения многолетне-мерзлых грунтов, выполнены на основе забивных типовых железобетонных свай. Данная конструкция характеризуется минимальными затратами на материалы, большой несущей способностью на горизонтальные нагрузки и на выдерживающую нагрузку, однако она наиболее подвержена действию сил морозного пучения. Для противодействия пучению разработано множество конструктивных и технологических мероприятий. Выполненный авторами анализ предложенных решений показал, что большинство мероприятий, реализованных в отечественной практике, требует проведения научно-исследовательских работ.

Целью настоящего исследования являлось обоснование применения поверхностных отдельных фундаментов, подтверждение эффективности, а также поиск наиболее рациональных конструктивных решений (конфигураций элементных фундаментов). Для анализа величин вертикальных деформаций и поведения элементных фундаментов различной конфигурации в целом были выбраны аналитические методы расчета, такие как метод послойного суммирования и метод линейно деформируемого слоя, а также численные методы, с применением специализированного геотехнического программного комплекса, реализующего метод конечных элементов.

Получены количественные данные по осадкам сплошного плитного и элементных фундаментов мелкого заложения, а также их влияния на массив грунта. Установлена эффективность применения элементных фундаментов в виде снижения вертикальных деформаций до 30–40 % по сравнению с типовым плитным вариантом сплошного сечения. Для каждой конфигурации фундамента представлены графические материалы включаемого в работу массива грунта.

Ключевые слова: элементные фундаменты, распределение напряжений, осадки, мерзлые грунты, метод послойного суммирования, метод линейно деформируемого слоя, метод конечных элементов

Для цитирования: Козловский В. Е., Смирнов И. М. Об эффекте снижения осадки при дискретизации фундамента // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 3 (80). С. 93–101. DOI 10.52170/1815-9265_2026_80_93.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

On the effect of reducing preparation during foundation discretisation

Vladimir E. Kozlovsky¹, Ivan M. Smirnov²✉

^{1,2}Emperor Alexander I Saint-Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

¹koslovskii@mail.ru

²sm.ivan00@gmail.com✉

Abstract. When designing and operating overhead power line pylons in challenging geological conditions, such as permafrost (perennially frozen) soils, particular attention must be paid to the design of the foundations. Most foundations constructed in areas with permafrost are built using standard driven reinforced concrete piles. In frozen soils, this design is characterized by relatively low material costs and greater load-bearing capacity for horizontal loads and uplift loads, however, this type of structure is most susceptible to the effects of frost heave. A wide range of structural and technical measures has been developed to counteract heave. The authors' analysis of the proposed solutions has shown that most of the measures implemented in domestic practice require further research.

The aim of this study was to justify the use of shallow strip foundations, to confirm their effectiveness, and to identify the most rational structural solutions (configurations of foundation elements). The aim of this study was to

justify the use of shallow strip foundations, to confirm their effectiveness, and to identify the most appropriate structural solutions (configurations of foundation elements).

To analyse vertical deformations and overall behaviour. For strip foundations of various configurations, analytical calculation methods were selected, such as the layer-by-layer summation method and the linearly deformable layer method, as well as numerical methods, using a specialized geotechnical software package implementing the finite element method. Quantitative data were obtained on the settlements of continuous slab and element foundations, as well as their influence on the surrounding soil mass. The effectiveness of using element foundations was established in terms of a reduction in vertical deformations of up to 30–40% compared to a standard continuous slab foundation. Graphical materials illustrating the behaviour of the soil mass are presented for each foundation configuration.

Keywords: element foundations, stress distribution, settlements, element system, layer-by-layer summation method, linearly deformable layer method, finite element method

For citation: Kozlovsky V. E., Smirnov I. M. On the effect of reducing preparation during foundation discretisation. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(80):93–101. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_80_93.

Введение

Развитие регионов России тесно связано с ростом темпов энергетического строительства. Для достижения целей развития электроэнергетики, с учетом принятых сценарных условий и эффективного реагирования на вызовы будущего, на законодательном [1] и локальных [2] уровнях закреплены следующие направления развития:

- повышение эффективности строительного производства;
- применение инновационных технологий строительства;
- сокращение капитальных затрат и сроков строительства вследствие применения инновационных конструкций и материалов, индустриализации строительства;
- повышение качества строительства и реконструкции воздушных линий электропере-

дачи (ВЛ), надежности и долговечности законченных строительством объектов [2].

С освоением северных районов, в том числе зон с распространением многолетне-мерзлых грунтов (рис. 1), возрастает объем строительства и эксплуатации объектов в зонах со сложными геологическими условиями. Достаточно распространенной проблемой для свайных фундаментов в подобных условиях является воздействие сил морозного пучения (рис. 2).

Для уменьшения подъема фундаментов при пучении и возникновения перекоса в отечественной практике встречаются следующие решения:

- дополнительная забивка свай, объединяемая в совместную работу с несущей свайей, или усиление фундаментов крестовыми сваями;
- обваловка фундаментов опор на высоту, исключаящую оттаивание зоны сезонного промерзания;



Рис. 1. Схема распространения многолетне-мерзлых пород на территории России [2]

а)



б)



Рис. 2. Деформации фундаментов ВЛ:
а – выпучивание; б – перекос

– стабилизация температурного режима вечномёрзлых грунтов установкой сезонно охлаждающих устройств (СОУ);

– установка пригрузочных свай для увеличения веса фундаментов;

– перестановка стоек опор на элементные фундаменты – конструкции, состоящие из отдельных рассредоточенных элементов, объединенных в единую систему (рис. 3).

Применение элементных фундаментов, как указывалось в исследованиях [3, 4], является эффективным конструктивным мероприятием, в том числе и для борьбы с морозным пучением. Подобное решение было реализовано на участке Тарко-Сале – Уренгой на ВЛ 500 (220) кВ [5].

Исследованиями свойств составных фундаментов, используемых в качестве конструктивных решений, занимались такие отечественные ученые, как П. И. Романов [3, 5], И. В. Якименко [6], М. И. Фидаров [7], А. Н. Богомоллов, О. А. Богомоллова [8] и др.

Однако выполненный авторами анализ показал, что большинство реализованных предложенных аналогичных решений требует прове-

дения научно-исследовательских работ, с определением области эффективного применения.

Цель исследования – обоснование применения поверхностных отдельных фундаментов, подтверждение большей эффективности элементных фундаментов по сравнению со сплошной плитной конструкцией, а также поиск наиболее рациональных конструктивных решений из шести разработанных конфигураций системы фундамента.

В настоящем исследовании была выполнена группа расчетов с применением различных методов, получены количественные данные по осадкам плитных и элементных фундаментов, а также представлены характерные картины влияния фундаментов на массив грунта.

Материалы и методы исследования

В качестве исходных данных для исследования был взят один из типовых фундаментов размером $1,50 \times 1,50$ м [9, 10]. Его площадь разбивается на несколько частей различной вариации с целью образования системы рассредоточенных элементов. В табл. 1 представлены геометрические характеристики шести собранных конфигураций элементного фундамента, которые

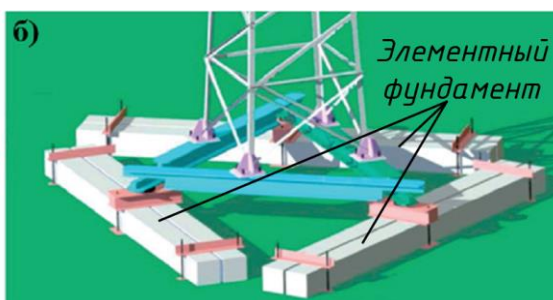
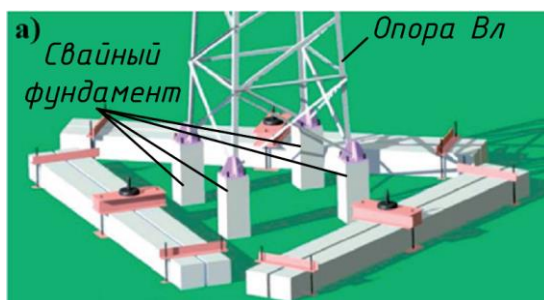


Рис. 3. Перестановка опор ПБ-1 на новые фундаменты без отключения ВЛ [5]:
а – опора на свайном фундаменте; б – опора на поверхностном элементном фундаменте

далее подверглись сравнению по одному из ключевых параметров при проектировании и эксплуатации фундаментов – величине осадки, реализующейся от нагрузки в 450 кН, приложенной к фундаменту в виде равномерно распределенной нагрузки.

Характеристики грунта, принятого в качестве основания, представлены в табл. 2.

На данный момент существует множество методов расчета осадки, с определенными допущениями и областями применения. Для получения более подробной картины деформации

Таблица 1

Основные конфигурации элементных фундаментов

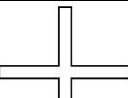
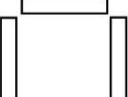
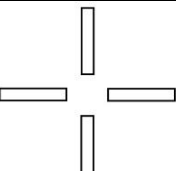
Тип	Схема	Описание	Площадь, м ²	Распр. нагрузка от 450 кН q, кПа
Цельный, квадратный		Опирается по площади 1,50 × 1,50 м	2,2500	200,00
Элементный, решетчатый		4 элемента 1,60 × 0,35 м, шаг в осях 1,00 м	2,2400	200,89
Элементный, двутавровый		3 элемента 2,00 × 0,35 м	2,1000	214,29
Элементный, крестовый, неразрывный		2 элемента 3,20 × 0,35 м	2,1175	212,51
Элементный, треугольный		3 элемента 2,00 × 0,35 м, пересечение осей 3,00 м	2,1000	214,29
Элементный, контурный		4 элемента 1,60 × 0,35 м, шаг в осях 2,00 м	2,2400	200,89
Элементный, крестовый, разрывный		4 элемента 1,60 × 0,35 м, центральный просвет 1,00 × 1,00 м	2,2400	200,89

Таблица 2

Нормативные и расчетные значения характеристик грунта

Номенклатурное наименование грунта	Характеристика	Коэфф. Пуассона ν	Число пластичности I_p	Плотность грунта ρ , г/см ³	Коэфф. пористости e	Показатель консолидации I_c	Показатели прочности		Модуль деформации E , МПа
							φ , град	c , кПа	
Глины пылеватые твердые зеленовато-серые дислоцированные	x_n	0,361	0,190	2,02	0,699	-0,06	14	67	18,5
	x_1			2,01			14	65	
	x_2			2,01			14	65	

Примечание. Характеристики грунта: x_n – нормативное значение; x_1 – для расчетов по несущей способности; x_2 – для расчетов по деформациям.

фундаментов различной конфигурации авторами статьи были выбраны несколько методов расчета – аналитические и численные.

В первом приближении использован инженерный метод послойного суммирования, основанный на задаче Лява – Короткина (рис. 4) для определения напряжений в точке:

$$\sigma_z = \frac{3qz^3}{2\pi} \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} \frac{d\xi d\eta}{[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2]^{\frac{5}{2}}}, \quad (1)$$

где q – равномерно распределенное давление по подошве рассматриваемого фундамента; a и b – стороны фундамента; x, y, z – координаты произвольной точки.

Величина осадки в границах сжимаемой толщи определяется по формуле

$$S = \frac{\beta}{E} \int_0^{H_c} \sigma_z, \quad (2)$$

где β – безразмерный коэффициент, учитывающий жесткость фундамента.

Для дополнения результатов использован метод линейно деформируемого слоя, при котором осадка вычисляется как разность осадок кровли и подошвы слоя по формуле

$$S(z) = q \frac{1-\nu^2}{2\pi E} \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} \left\{ \frac{2}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2}} + \frac{1}{1-\nu} \frac{z^2}{[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2]^{\frac{3}{2}}} \right\} d\xi d\eta, \quad (3)$$

$$S = S(0) - S(H_c), \quad (4)$$

где ν – коэффициент Пуассона.

Для получения графической картины деформаций основания использован численный метод, с применением специализированного геотехнического программного комплекса Midas FEA NX, реализующего метод конечных элементов.

Решение задачи выполнялось в пространственной постановке с учетом стадийности работ (рис. 5):

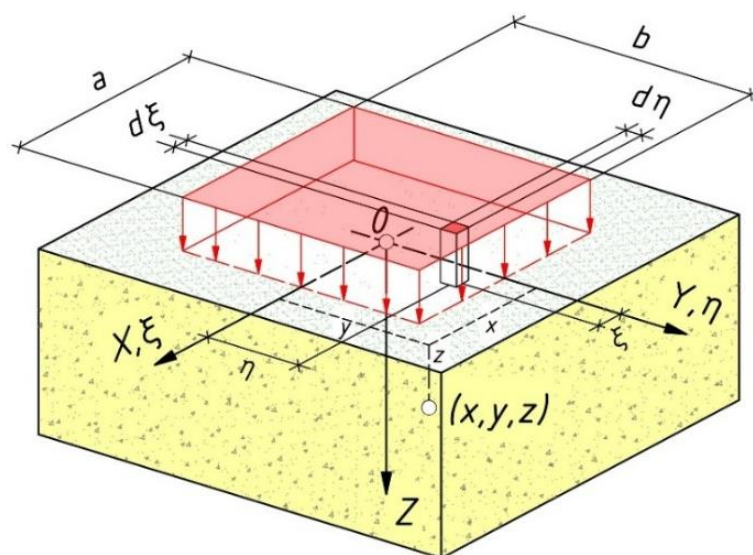
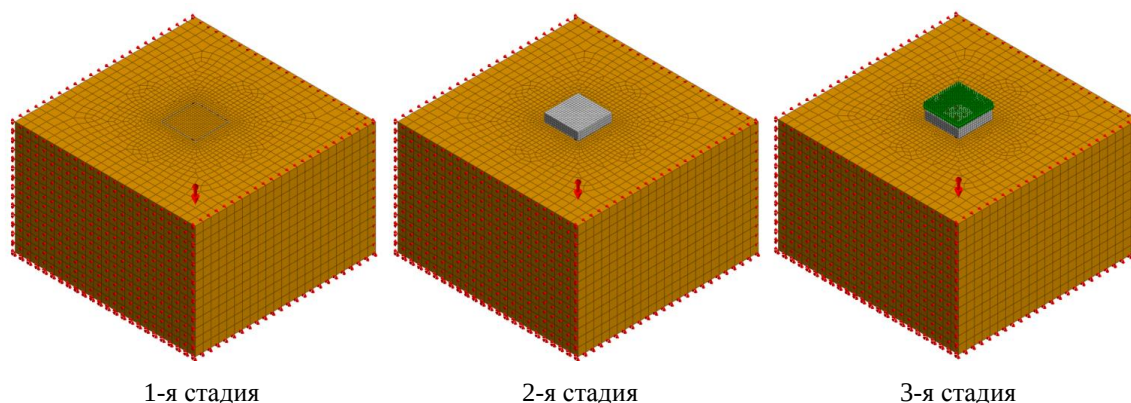


Рис. 4. Схема к определению напряжений в задаче Лява – Короткина



1-я стадия

2-я стадия

3-я стадия

Рис. 5. Учет стадийности работ при решении методом конечных элементов

1-я стадия – природное состояние (формирование НДС массива грунта);

2-я стадия – строительство (устройство фундамента);

3-я стадия – эксплуатация (загружение фундамента).

Результаты исследования

В качестве базовой величины, на основе которой вычисляется доля в процентах (табл. 3), принята вертикальная деформация сплошного плитного фундамента (конфигурация 1).

На рис. 6 представлены изополя вертикальных деформаций, полученные в результате численных вычислений. Цветовое ранжи-

рование выполнено на базе первого фундамента с максимальной осадкой в 10,07 мм.

Для более наглядной интерпретации результатов на рис. 7 приведена диаграмма соотношения результатов осадки по каждой конфигурации фундамента.

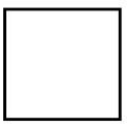
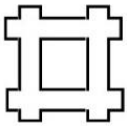
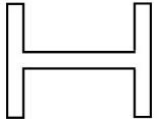
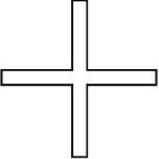
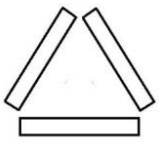
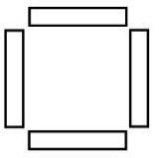
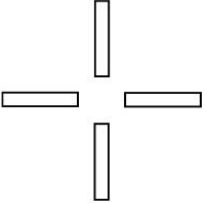
Выводы

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Доказана эффективность дискретизации сплошного фундамента (конфигурация 1). За счет перехода на систему рассредоточенных элементов для конфигурации 2 отмечено сокращение расхода материалов до 30 %, а для конфигураций 3–7

Таблица 3

Сводная таблица результатов аналитического и численного расчетов

№	Конфигурация элементного фундамента	Метод послойного суммирования		Метод линейно дефор- мируемого слоя		Метод конечных элементов	
		Осадка, мм	Процент осадки	Осадка, мм	Процент осадки	Осадка, мм	Процент осадки
1		11,77	100,00	12,12	100,00	10,07	100,00
2		11,04	93,80	10,93	90,18	9,94	98,71
3		9,28	78,85	9,46	78,06	7,42	73,68
4		8,08	68,65	8,14	66,67	7,63	75,77
5		7,43	63,13	7,47	61,63	7,38	73,29
6		6,62	56,25	6,62	54,62	7,12	70,71
7		5,65	48,01	5,66	46,70	6,78	67,33

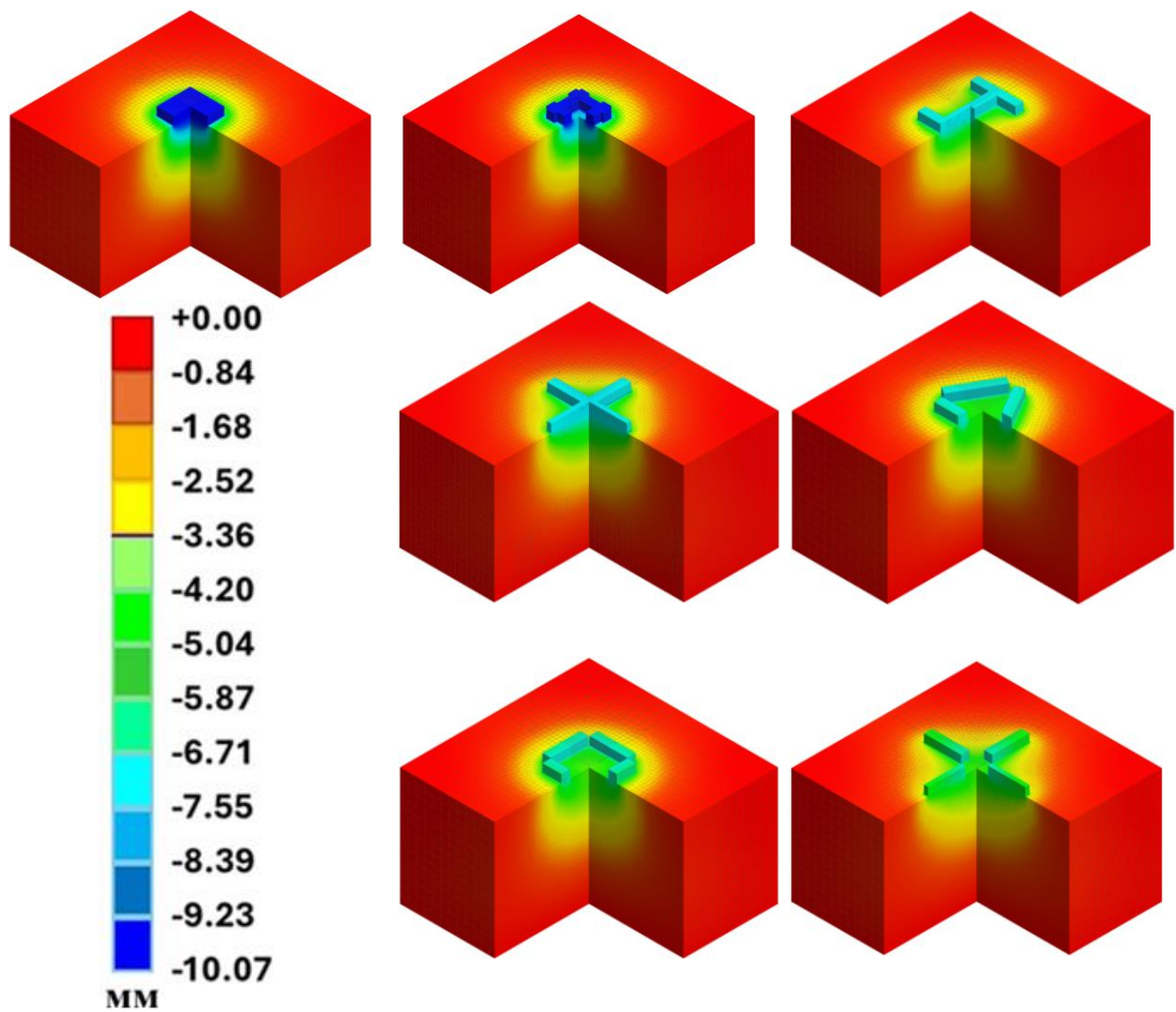


Рис. 6. Изополя вертикальных деформаций грунтового массива для конфигураций 1–7 с вертикальным разрезом четверти модели

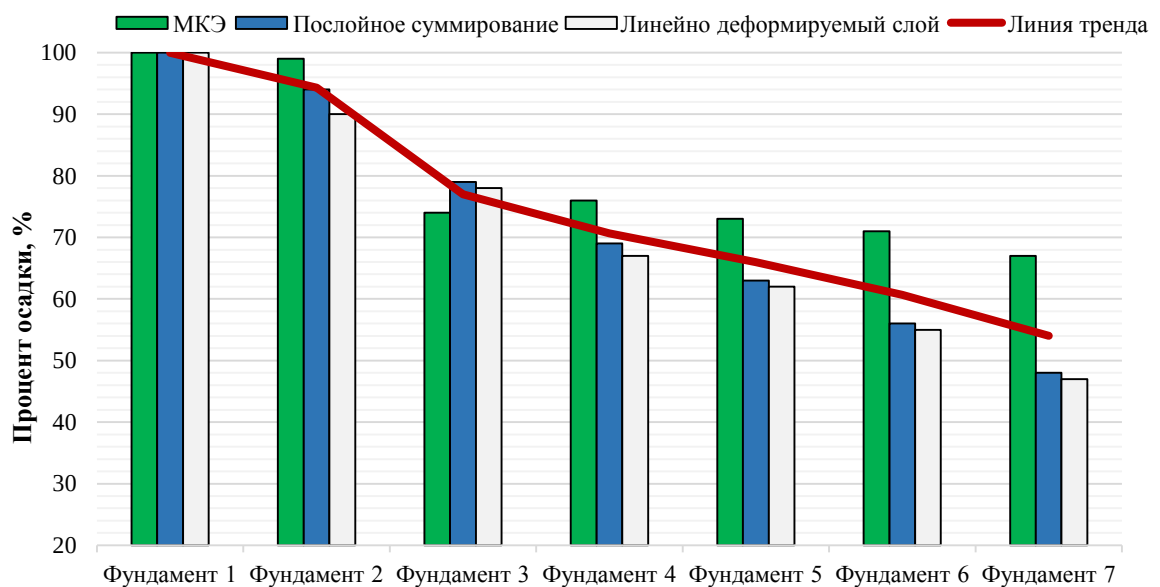


Рис. 7. Диаграмма снижения вертикальных деформаций

(при схожем расходе железобетона) – снижение величины вертикальных деформаций до 30–40 %.

2. Подобное решение может быть реализовано в строительной практике в качестве мероприятий, направленных на борьбу с морозным пучением.

3. Анализ результатов численных расчетов доказывает и гипотезу о повышении несущей способности фундамента за счет увеличения

объема включаемого в работу массива грунта (более эффективного распределения напряжений в грунте).

4. Конструктивные мероприятия в виде дискретизации фундамента подлежат дальнейшему научному анализу с целью более точного определения области эффективного применения и более подробного анализа свойств элементных фундаментов.

Список источников

1. Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2050 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 12 апреля 2025 г. № 908-р. // Официальное опубликование правовых актов : [сайт]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202504140013> (дата обращения: 21.02.2026).

2. Обзор практически реализованных фундаментов опор ВЛ 220 кВ и выше для мерзлых грунтов / ФСК ЕЭС РОССЕТИ // Научно-исследовательская лаборатория конструкций электросетевого строительства : [сайт]. URL: <https://нилкэс.рф/wp-content/uploads/2022/10A1.pdf> (дата обращения: 21.02.2026).

3. Романов П. И., Козловский В. Е. Концепция нового поколения фундаментов опор ВЛ // Фундаменты. 2024. № 2 (16). С. 48–51.

4. Козловский В. Е., Смирнов И. М. Об элементных фундаментах опор высоковольтных линий // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2024. Т. 21, № 2. С. 489–497.

5. Романов П. И. Перестановка опор ВЛ на поверхностные фундаменты – решение проблем с пучением свайных оснований // Опоры и фундаменты для умных сетей: инновации в проектировании и строительстве : сборник докладов. Санкт-Петербург, 2018. С. 8–13.

6. Якименко И. В. К вопросу о несущей способности составных ленточных фундаментов // Вестник Евразийской науки. 2018. № 2. URL: <https://esj.today/PDF/49SAVN218.pdf> (дата обращения: 21.02.2026).

7. Фидаров М. И. Проектирование и возведение прерывистых фундаментов. Москва : Стройиздат, 1986. 157 с.

8. Богомолов А. Н., Якименко И. В., Богомолова О. А. Повышение несущей способности основания как следствие использования составных ленточных фундаментов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2010. Вып. 19 (38). С. 5–11.

9. Типовые конструкции и детали зданий и сооружений. Серия 3.407-115. Фундаменты под унифицированные металлические опоры ВЛ 35-330 кВ // МЕГАНОРМ : система нормативных документов : [сайт]. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293833/4293833466.htm> (дата обращения: 21.02.2026).

10. Типовые конструкции и детали зданий и сооружений. Серия 3.407.1-144. Унифицированные конструкции фундаментов для стальных опор ВЛ 35-500 кВ // МЕГАНОРМ : система нормативных документов : [сайт]. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293845/4293845236.htm> (дата обращения: 21.02.2026).

References

1. Order of the Government of the Russian Federation of April 12, 2025 No. 908-r. 'On approval of the Energy Strategy of the Russian Federation for the period up to 2050'. (In Russ.). URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202504140013>.

2. Review of practically implemented foundations for 220 kV and higher overhead line supports in frozen soils. FGC UES ROSSETI. Research Laboratory of Electrical Grid Construction Designs. (In Russ.). URL: <https://нилкэс.рф/wp-content/uploads/2022/10A1.pdf>.

3. Romanov P. I., Kozlovsky V. E. Concept of a new generation of overhead line support foundations. *Foundations*. 2024;(16):48–51. (In Russ.).

4. Kozlovsky V. E., Smirnov I. M. On elemental foundations for high-voltage line supports. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2024;21(2):489–497. (In Russ.).

5. Romanov P. I. Relocation of overhead line supports to surface foundations: solving the problem of heaving pile foundations. *Proceedings. Supports and Foundations for Smart Grids: Innovations in Design and Construction*. St. Petersburg; 2018. P. 8–13. (In Russ.).

6. Yakimenko I. V. On the bearing capacity of precast strip foundations. *Bulletin of Eurasian Science*. 2018. No. 2. (In Russ.). URL: <https://esj.today/PDF/49SAVN218.pdf>.
7. Fidarov M. I. Design and construction of intermittent foundations. Moscow: Stroyizdat; 1986. 157 p. (In Russ.).
8. Bogomolov A. N., Yakimenko I. V., Bogomolova O. A. Increasing the bearing capacity of the foundation as a result of using precast strip foundations. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and architecture*. 2010;19(38):5–11. (In Russ.).
9. Standard Foundations for Unified Metal Supports for 35-330 kV Overhead Lines, Series 3.407-115. *MEGANORM: system of regulatory documents: [site]*. (In Russ.). URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293833/4293833466.htm>.
10. Standard Foundation Designs for Steel Supports for 35-500 kV Overhead Lines, Series 3.407.1-144. *MEGANORM: system of regulatory documents: [site]*. (In Russ.). URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293845/4293845236.htm>.

Информация об авторах

В. Е. Козловский – кандидат технических наук, доцент кафедры «Основания и фундаменты» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

И. М. Смирнов – аспирант кафедры «Основания и фундаменты» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

Information about the authors

V. E. Kozlovsky – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Bases and Foundations Department, Emperor Alexander I Saint-Petersburg State Transport University.

I. M. Smirnov – Postgraduate Student of the Bases and Foundations Department, Emperor Alexander I Saint-Petersburg State Transport University.

Статья поступила в редакцию 14.04.2026; одобрена после рецензирования 11.05.2026; принята к публикации 18.06.2026.

The article was submitted 14.04.2026; approved after reviewing 11.05.2026; accepted for publication 18.06.2026.

Научная статья
УДК 691.328:539.37
doi:10.52170/1815-9265_2026_80_102

Исследование усилий взаимодействия рельсов и шпал при неравномерной осадке железнодорожного пути

Виктор Михайлович Тихомиров¹, Сергей Иванович Герасимов^{2✉},
Анатолий Михайлович Попов³

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

¹ twm@stu.ru

² gerasimov@stu.ru✉

³ termech@stu.ru

Аннотация. В работе исследовано взаимодействие рельса со шпалами при неравномерной осадке железнодорожного пути. Наличие зазоров между элементами верхнего строения пути, различие их механических характеристик, а также изменение жесткости грунтового основания приводит к осадкам, неравномерно распределенным вдоль направления рельсовой колеи. В процессе эксплуатации при повышении осевых нагрузок и грузонапряженности влияние этих факторов увеличивается. В конечном итоге на шпалы приходится большая нагрузка по сравнению с расчетным состоянием пути.

Аналитическое решение задачи об определении усилий взаимодействия рельсов со шпалами при неравномерной осадке представляется затруднительным и громоздким. В данной работе был использован метод численного моделирования – метод конечных элементов. Деформирование рельса было описано решением для балки, опирающейся на упругое основание, давление на которое пропорционально прогибам рельса. На основании такого представления в программном комплексе COSMOS была построена конечно-элементная схема рельса под воздействием динамической нагрузки. Осадка пути моделировалась с помощью специальных контактных конечных элементов. Для решения поставленной задачи были использованы четыре различные схемы осадки пути и проведен конечно-элементный расчет по определению давления рельса на шпалы. Анализ результатов позволил определить наиболее неблагоприятные условия осадки подрельсового основания. Было получено, что осадка пути, при которой одна шпала выключается из работы его верхнего строения, приводит к увеличению давления на 25 %. При осадке четырех соседних шпал максимальное давление со стороны рельса увеличивается в 2,16 раза по сравнению с расчетным состоянием пути. Данное обстоятельство необходимо учитывать при оценке прочности железнодорожных шпал.

Ключевые слова: неравномерная осадка железнодорожного пути, взаимодействие рельсов и шпал, балка на упругом основании, метод конечных элементов

Для цитирования: Тихомиров В. М., Герасимов С. И., Попов А. М. Исследование усилий взаимодействия рельсов и шпал при неравномерной осадке железнодорожного пути // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 3 (80). С. 102–108. DOI 10.52170/1815-9265_2026_80_102.

Original article

Study of the interaction forces between rails and sleepers in case of uneven track settlement

Victor M. Tikhomirov¹, Sergey I. Gerasimov^{2✉}, Anatoly M. Popov³

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

¹ twm@stu.ru

² gerasimov@stu.ru✉

³ termech@stu.ru

Abstract. The study examines the effect of uneven track settlement on the force interaction between rails and sleepers when affecting the track of a freight train. Due to the presence of gaps between the elements of the track superstructure, the difference in the mechanical characteristics of the elastic gaskets and the soil base in the longitudinal direction, the settlement of the sleepers may be uneven. The importance of this factor increases with increasing axial loads and load stress. In the end, individual sleepers have a greater load than others compared to the calculated normative state of the track.

The analytical solution to the problem of determining the interaction forces between rails and sleepers under uneven settlement proves to be difficult and cumbersome. In this work, the numerical modeling method was used – the finite element method. For the rail, a mathematical model of the beam was used, resting on an elastic base, the pressure on which linearly depends on the movements of the rail, and its rigidity on a combination of deformation characteristics of rail and napkin rubber pads and soil. Based on this model, a finite element scheme for calculating rails supported by sleepers under the influence of a standard load was built. Track settlement was modeled by changing the parameters of special contact finite elements. When varying the parameters of these elements, the maximum rail pressure on a single sleeper was calculated. From the analysis of the results, the most unfavorable cases of base settlement unevenness were identified. It was found that the settlement of the track, in which one sleeper is turned off from the operation of the topsides, leads to an increase in maximum pressure by 25%. The shutdown of four adjacent sleepers increases the maximum pressure by 2.16 times compared to the standard condition of the railway track. This circumstance should be taken into account when calculating the strength of railway ties.

Keywords: uneven track settlement, interaction of rails and sleepers, beam on linearly elastic base, finite element method

For citation: Tikhomirov V. M., Gerasimov S. I., Popov A. M. Study of the interaction forces between rails and sleepers in case of uneven track settlement. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(80):102–108. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_80_102.

Введение

При проведении нормативного расчета давления рельса на шпалу предполагается, что значение жесткости подрельсового основания в продольном направлении не изменяется, а зазоры между грунтом и шпалами отсутствуют. В результате при движении состава рельс на все шпалы оказывает одинаковое давление. При наличии зазоров между элементами верхнего строения пути, различии механических характеристик упругих прокладок и грунтового основания в продольном направлении реальная осадка пути оказывается неравномерной [1, 2]. Неравномерность осадки возрастает по мере увеличения осевых нагрузок и грузонапряженности пути. На этот процесс также влияет воздействие жестких климатических условий. В конечном итоге на некоторые шпалы приходится бóльшая поездная нагрузка, чем на другие [3, 4]. В свою очередь, это приводит к повышенному выходу шпал из строя.

В данной работе проведено исследование взаимодействия элементов верхнего строения пути при наличии неравномерной осадки подрельсового основания. Решение задачи об определении усилий взаимодействия элементов конструкций при неравномерной осадке оснований представляется затруднительным и громоздким [5–7]. Поэтому для моделирования деформирования рельсовой плети, опирающейся на упругое основание при его неравномерной осадке, был использован метод конечных элементов (МКЭ) [8]. МКЭ реализован во многих программных комплексах и адаптирован для решения различного рода задач механики. В данной работе конечно-элементные модели рельсовой плети были построены в среде программного комплекса COSMOS [9].

Методы исследования

Рельс опирается на основание, которое включает комбинацию разнородных элементов: резиновых и стальных подкладок, железобетонной шпалы, земляного полотна. Поэтому взаимодействие данных элементов представляет собой сложный процесс, на который влияет множество факторов. Реальные условия контактного рельса и смоделировать достаточно сложно. Поэтому будем использовать упрощенную модель, которая применяется в методике расчета верхнего строения пути на прочность, – модель рельса на упругом основании Винклера. При такой постановке задачи интенсивность отпора силового взаимодействия рельса и основания q прямо пропорциональна прогибу y [10, 11]:

$$q = Uy, \quad (1)$$

где U – модуль упругости подрельсового основания, учитывающий жесткость всех элементов, на которые опирается рельсовая плеть, и задаваемый по нормативам.

Для верификации предложенной модели сначала рассмотрим опирание рельса на сплошное упругое основание. Конечно-элементную модель рельса построим с помощью двухузловых линейных конечных элементов (КЭ), которые воспринимают плоский прямой изгиб от поездной нагрузки. В библиотеке программного комплекса COSMOS это балочный элемент BEAM2D (рис. 1). Реальные константы данного КЭ соответствуют механическим и геометрическим характеристикам рельса Р65 [12]: модуль упругости $2 \cdot 10^5$ МПа; плотность стали 7 800 кг/м³; площадь поперечного сечения рельса 82,65 см²; момент инерции сечения 3 540 см⁴; высота рельса 180 мм.

Основание моделировалось с помощью опорных контактных элементов, которые уста-

навливались под каждый узел балочных КЭ (см. рис. 1). В программном комплексе COSMOS/M это линейные двухузловые гар-элементы, которые передают давление балки на контактный элемент только при условии закрытия условного зазора Δ . Для контактных элементов задавались значения жесткости c и зазора Δ , который для нашей задачи моделировал осадку основания или в реальности – зазор между шпалами и грунтом.

Сравнивая вертикальное перемещение рельса y и деформацию опорного элемента, получим $y = \frac{F}{c}$. Усилие F , действующее в опорном элементе, выразим через давление основания на рельс q :

$$F = q \frac{L}{n}, \quad (2)$$

где n – количество балочных КЭ по длине модели L (см. рис. 1).

Следовательно, жесткость элемента связана с параметрами модели следующим образом:

$$c = \frac{q L}{y n}. \quad (3)$$

Учитывая соотношения (1), (2) и (3), получим расчетную формулу для определения жесткости контактного элемента:

$$c = \frac{UL}{n}. \quad (4)$$

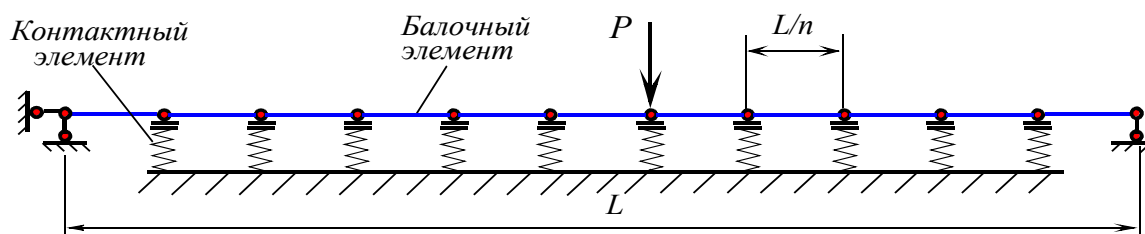


Рис. 1. Конечно-элементная модель рельса на упругом основании

Чтобы определить размер балочных КЭ, при котором численный расчет дает достаточно точный результат, были проведены численные эксперименты при разном соотношении L/n . На рис. 2 представлен график зависимости погрешности конечно-элементного расчета $\eta = \frac{y_a - y_{МКЭ}}{y_a} \cdot 100\%$ от значения L/n .

Здесь $y_{МКЭ}$ – перемещения рельса, определенные по результатам численного расчета; y_a – прогибы, определенные с помощью аналитического решения [11]:

$$y_a = \frac{Pk}{2U}, \quad k = \sqrt[4]{\frac{U}{4EJ_z}}. \quad (5)$$

В результате видно, что при $L/n > 1\,000$ погрешность численного расчета практически равна нулю. Это условие было использовано при дальнейшем численном анализе.

В пути рельс опирается на шпалы, а точнее, на стальную подкладку шириной $b_n = 140$ мм. Для учета этого обстоятельства опорные элементы устанавливались не под каждый узел балочных КЭ, а периодически, на участках, которые соответствовали ширине подкладки (рис. 3).

Сравнивая суммарную жесткость опорных элементов и жесткость подрельсового основания, получим формулу для расчета жесткости опорных элементов

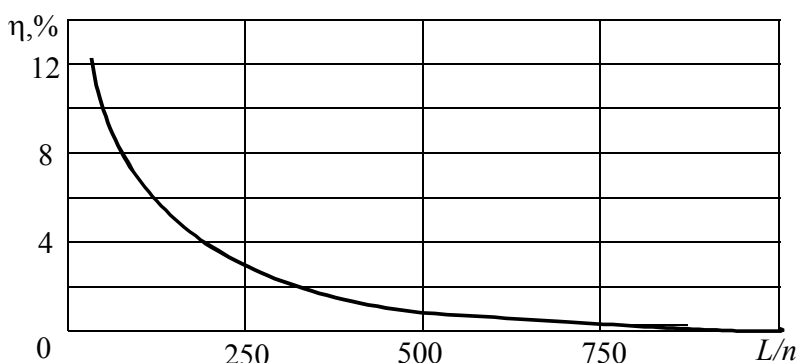


Рис. 2. Погрешность конечно-элементного расчета

$$c = \frac{ULl_{ш}}{nb_{п}} = Ul \frac{l_{ш}}{b_{п}}, \quad (6)$$

где $l_{ш}$ – расстояние между шпалами; l – размер балочного КЭ.

Нагрузки, которые передаются от колесной пары грузового вагона на рельс, определим по методике расчета пути на прочность [11], учитывая параметры движения и характеристики подрельсового основания, представленные в табл. 1.

В результате максимальная динамическая нагрузка $P_{\max} = 199\,000$ Н, среднее динамическое усилие $P_{\text{ср}} = 167\,000$ Н. На рис. 4 приведена расчетная схема участка пути.

Для исследования влияния сил тяжести на деформирование рельсовой плети были проведены расчеты МКЭ с учетом и без учета веса. Для учета веса рельсошпальной решетки увеличим плотность материала балочного элемента. Для этого к весу 1 м стандартного рельса Р65

(65 кг) добавим вес одной шпалы (297 кг). Таким образом, плотность модельного материала была увеличена по сравнению с плотностью стали в $(65 + 297)/65 = 5,57$ раза. При расчете длина расчетного участка $L = 12$ м, размер балочного КЭ $l = 10$ мм. На рис. 5 представлены результаты определения перемещений рельса. Здесь сплошной линией показан деформированный вид рельсовой плети без учета веса, пунктирной – с учетом действия сил тяжести.

На шпалу, расположенную под нагрузкой $P_{\max}$ (см. рис. 5), рельс оказывает максимальное давление, которое составило 69,3 кН.

На рис. 6 показана схема моделирования неравномерной осадки пути. Здесь, задавая различные значения параметров $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4$, получали различную степень неравномерности осадки расчетного участка пути. При этом было использовано четыре схемы: первая – изменяется зазор Δ_1 , а $\Delta_2 = \Delta_3 = \Delta_4 = 0$ и остаются

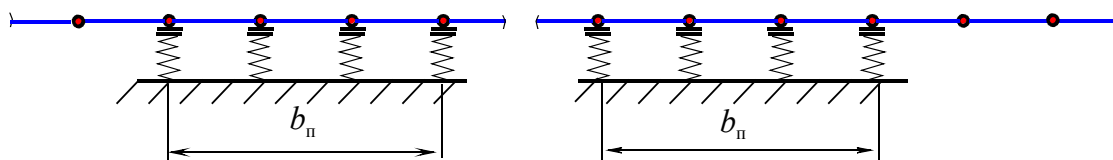


Рис. 3. Конечно-элементная схема при опирании рельса на шпалы

Таблица 1

Исходные данные для расчета динамических нагрузок на рельс

Параметр	Значение
Расстояние между осями шпал $l_{ш}$, м	0,5
Расстояние между осями колесных пар, м:	
l_1	1,85
l_2	6,75
Статическая нагрузка на ось $P_{ос}$, кН	250
Скорость движения состава V , км/ч	80
Модуль подрельсового основания U , МПа	105

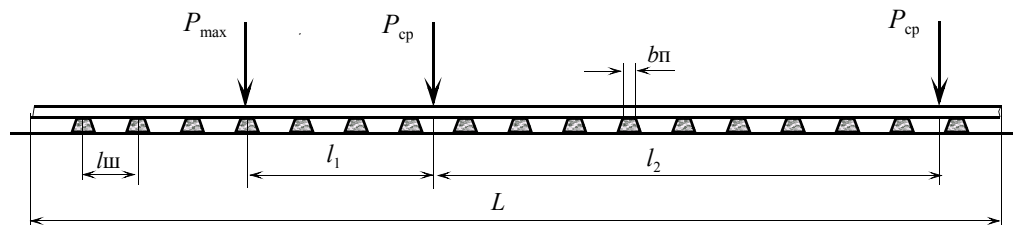


Рис. 4. Расчетная схема участка рельсовой плети

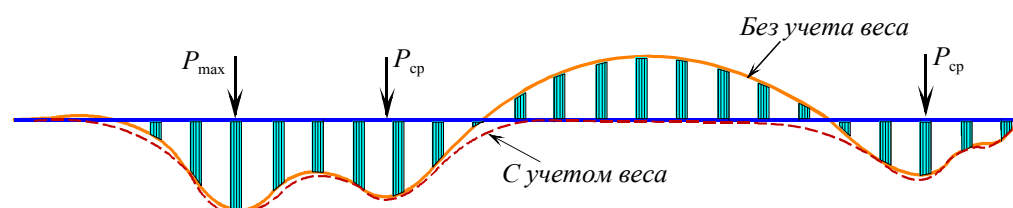


Рис. 5. Деформированный вид рельса

постоянными; вторая – варьируются зазоры Δ_1 и Δ_2 , а $\Delta_3 = \Delta_4 = 0$; третья – изменяется зазор Δ_3 , $\Delta_1 = 2,5$ мм, $\Delta_2 = 2,0$ мм, $\Delta_4 = 0$; четвертая – варьируется зазор Δ_4 , а $\Delta_1 = 2,5$ мм, $\Delta_2 = 2,0$ мм, $\Delta_3 = 2,5$ мм.

Результаты конечно-элементного расчета по первой схеме осадки представлены в табл. 2. Видно, что при осадке 1-й шпалы на 1,3 мм она перестает взаимодействовать с рельсом. Максимальное давление на расчетную шпалу при этом возрастает на 25 %.

Результаты определения максимального давления по второй схеме осадки основания

представлены в табл. 3. При осадке 1-й и 2-й шпал более 1,7 мм они выключаются из работы основания, а максимальное давление на шпалу, по сравнению с первоначальным значением $Q_{\max} = 69,3$ кН, возрастает на 44 %.

Результаты расчета по третьей схеме осадки основания представлены в табл. 4. При осадке 1, 2 и 3-й шпал на величину более 2 мм рельс перестает на них опираться, а максимальное давление возрастает на 82 %.

Результаты расчета по четвертой схеме представлены в табл. 5. При осадке четырех соседних шпал на величину более 2,5 мм они

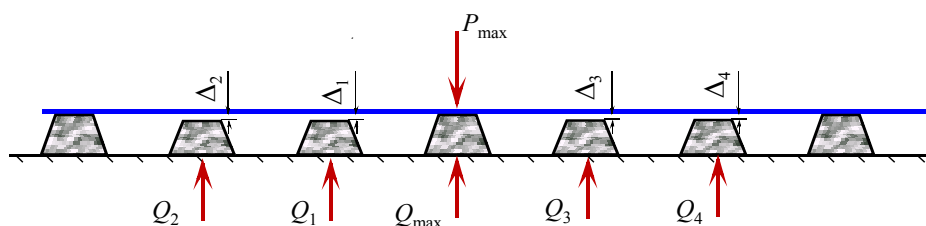


Рис. 6. Схема моделирования неравномерности осадки пути

Таблица 2

Максимальное давление на шпалу при варьировании зазора Δ_1

Δ_1 , мм	$Q_{\max}$, кН	Q_1 , кН
0,0	69,3	45,5
1,1	84,6	2,3
1,2	86,0	0,5
1,3	86,7	0,0

Таблица 3

Влияние величины осадки второй шпалы на максимальное давление

Δ_1 , мм	Δ_2 , мм	$Q_{\max}$, кН	Q_1 , кН	Q_2 , кН
1,3	0,5	90,6	1,93	16,5
1,5	0,5	92,5	0,0	18,4
1,5	1,0	96,5	1,5	0,1
1,5	1,5	97,0	2,7	0,0
1,7	1,5	100,0	0,0	0,0

Таблица 4

Влияние величины осадки третьей шпалы на максимальное давление

Δ_3 , мм	$Q_{\max}$, кН	Q_3 , кН
1,2	124,7	15,9
1,6	124,7	0,3
2,0	126,0	0,0

Таблица 5

Влияние величины осадки четвертой шпалы на максимальное давление

Δ_4 , мм	Δ_4 , мм	$Q_{\max}$, кН	Q_3 , кН	Q_4 , кН
2,0	1,0	136,5	1,0	30,2
2,0	1,5	139,4	7,0	10,7
2,0	2,0	141,5	12,4	0,0
2,5	2,0	149,6	0,0	0,0

выключаются из работы основания, а максимальное давление на шпалу, по сравнению с первоначальной величиной, возрастает на 116 %.

Выводы

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. Построена математическая модель взаимодействия рельса и шпал, которая позволила учесть реальные граничные условия опирания рельса на основание и неравномерность его осадки. Модель реализована в конечно-элементной среде программного комплекса COSMOS.

2. При анализе результатов расчета по четырем вариантам неравномерности осадки грунтового основания установлены наиболее неблаго-

приятные условия осадки и определены максимальные значения давления на шпалы.

3. Получено, что осадка пути, при которой одна шпала выключается из работы его верхнего строения, приводит к увеличению давления на 25 %. При осадке четырех соседних шпал максимальное давление со стороны рельса увеличивается в 2,16 раза по сравнению с расчетным состоянием пути. Результаты исследования позволят более точно оценивать прочность железнодорожных шпал при изменении режимов эксплуатации железнодорожного пути – повышении нагрузок на ось и грузонапряженности пути, использовании шпал новых конструкций.

Список источников

1. Оценка деформативности пути в местах расстройств и возможных изменений в сроках выправки при повышении осевой нагрузки грузовых вагонов / В. О. Певзнер, С. С. Надеждин, А. В. Анисин, И. В. Третьяков // Вестник ВНИИЖТа. 2013. № 4. С. 44–48.

2. Shenton M. J. Ballast deformation and track deterioration track technol // Proc. Conf. Nottingham, 11–13 July 1981, London. 1985. P. 253–265.

3. Сахарчук С. И., Федорова В. А. Моделирование процесса накопления остаточных деформаций в однородных средах и двухслойных системах // Вестник РГРТУ. 2009. № 3, вып. 29. С. 60–65.

4. Щепотин К. И. О перераспределении давления на шпалы при наличии неравноупругости пути // Вопросы устройства и содержания пути : сборник научных трудов / Новосибирский институт инженеров железнодорожного транспорта. Новосибирск, 1969. Вып. 74. С. 42–47.

5. Соловьев В. П. Моделирование процесса накопления остаточных деформаций пути с использованием супер ЭВМ // Фундаментальные исследования для долгосрочного развития железнодорожного транспорта : сборник трудов членов и научных партнеров Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». Москва : Интекст, 2013. С. 185–192.

6. Брандль Х., Паульмичл А. Взаимодействие оснований и сооружений высокоскоростных железных дорог : лекция, прочитанная на XIII Дунайско-Европейской конференции по геотехнике в г. Любляне, Словения (29–31 мая 2006 г.) // Развитие городов и геотехническое строительство. 2007. № 11. С. 157–164.

7. Моделирование неравномерной осадки оснований каркасных сооружений / С. И. Герасимов, В. М. Тихомиров, А. М. Попов [и др.] // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2026. Т. 28, № 1. С. 288–297.

8. Зенкевич О., Чанг И. Метод конечных элементов в теории сооружений и в механике сплошных сред. Москва : Недра, 1974. 239 с.

9. COSMOSM User Guide. Vol. 4. Advanced Modules. Santa Monica (CA) : Structural Research and Analysis Corporation, 2007. 328 p.

10. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности : утверждена Распоряжением МПС России 16 июня 2000 г. Москва, 2000. 38 с.

11. Железнодорожный путь / под ред. Т. Г. Яковлевой. Москва : Трансжелдориздат, 2001. 404 с.

12. ГОСТ Р 51685–2022. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 14 декабря 2022 г. № 1509-ст. Москва : Российский институт стандартизации, 2023. 125 с.

Reference

1. Pevzner V. O., Nadezhdin S. S., Anisin A. V., Tretyakov I. V. Assessment of track deformability in areas of disturbances and possible changes in alignment times with an increase in the axle load of freight. *Bulletin of the All-Russian Research Institute of Railway Transport*. 2013;(4):44–48. (In Russ.).

2. Shenton M. J. Ballast deformation and track deterioration track technol. *Proc. Conf. Nottingham, 11–13, July, 1981, London*. 1985. P. 253–265, 267– 279. Express information “The Route and Construction of Railways”. 1986. No. 43.

3. Sakharchuk S. I., Fedorova V. A. Modeling the accumulation process of residual deformations in homogeneous media and two-layer systems. *Vestnik of RSREU*. 2009;3(29):60–65. (In Russ.).
4. Shchepotin K. I. On the redistribution of pressure on sleepers in the presence of unequal elasticity of the track. *Issues of Track Design and Maintenance. Proceedings*. Novosibirsk Institute of Railway Engineers. Novosibirsk; 1969. Issue 74. P. 42–47. (In Russ.).
5. Soloviev V. P. Modeling the process of accumulation of residual deformations of the track using a supercomputer. *Fundamental Research for the Long-term Development of Railway Transport. Proceedings of Papers of Members and Scientific Partners of the United Academic Council of Russian Railways*. Moscow: Intekst; 2013. P. 185–192. (In Russ.).
6. Brandl H., Paulmichl A. Interaction of foundations and structures of high-speed railways. Materials of the International XIII Danube-European Conference on Geotechnics, Ljubljana, Slovenia, 29–31 May 2006. *Urban Development and Geotechnical Engineering*. 2007;(11):157–164. (In Russ.).
7. Gerasimov S. I., Tikhomirov V. M., Popov A. M. [et al.]. Modeling of uneven settlement of foundations of frame structures. *Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2026;28(1):288–297. (In Russ.).
8. Zenkevich O., Chang I. Finite element method in the theory of structures and in continuum mechanics. Moscow: Nedra; 1974. 239 p. (In Russ.).
9. COSMOSM User Guide. Vol. 4: Advanced Modules. Santa Monica (CA): Structural Research and Analysis Corporation; 2007. 328 p.
10. Methodology for assessing rolling stock on a track based on reliability conditions: approved by Order of the Ministry of Railways of Russia dated 16.06.2000. Moscow; 2000. 38 p. (In Russ.).
11. Railway track. Edited by T. G. Yakovleva. Moscow: Transzheldorizdat; 2001. 404 p. (In Russ.).
12. GOST R 51685–2022. Railway Rails. General Specifications: approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology No. 1509-st dated 14.12.2022. Moscow: Russian Institute of Standardization; 2023. 125 p. (In Russ.).

Информация об авторах

В. М. Тихомиров – доктор технических наук, профессор кафедры «Строительная механика» Сибирского государственного университета путей сообщения.

С. И. Герасимов – доктор технических наук, профессор кафедры «Строительная механика» Сибирского государственного университета путей сообщения.

А. М. Попов – доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая механика» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

V. M. Tikhomirov – Doctor of Engineering, Professor of the Structural Mechanics Department, Siberian Transport University.

S. I. Gerasimov – Doctor of Engineering, Professor of the Structural Mechanics Department, Siberian Transport University.

A. M. Popov – Doctor of Engineering, Professor of the Theoretical Mechanics Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 02.06.2026; одобрена после рецензирования 06.08.2026; принята к публикации 31.08.2026.

The article was submitted 02.06.2026; approved after reviewing 06.08.2026; accepted for publication 31.08.2026.

Научная статья

УДК 624.3

doi:10.52170/1815-9265_2026_80_109

Методика предиктивного прогнозирования при проведении мониторинга технического состояния искусственных сооружений

Олег Владимирович Осетинский^{1✉}, Юрий Георгиевич Лазарев²,
Андрей Анатольевич Белый³

^{1, 2} Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

¹ «Комплексные Системы и Сети», Санкт-Петербург, Россия

³ «K2 Инжиниринг», Москва, Россия

³ Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан

¹ 89095847909@mail.ru✉

² lazarev-yurij@yandex.ru

³ andbeliy@mail.ru

Аннотация. В статье предложена методика предиктивного прогнозирования технического состояния искусственных сооружений на основе интеграции данных автоматизированных систем мониторинга, эталонной расчетной модели и библиотеки дефектных сценариев. Методика направлена на повышение достоверности определения фактического технического состояния конструкции и точности прогноза его изменения во времени, включая оценку остаточного ресурса. Подход основан на представлении состояния конструкции в виде многомерного вектора признаков напряженно-деформированного состояния с последующим применением методов таксономического анализа для оценки близости к эталонному и дефектным состояниям.

Введен интегральный показатель – таксономический индекс технического состояния, позволяющий количественно оценивать степень деградации конструкции и выделять переходные состояния на ранних стадиях развития дефектов. Разработан алгоритм классификации, обеспечивающий оценку наиболее вероятного типа дефекта (коррозия, усталостная трещина, заклинивание опорных частей) и ориентировочную локализацию по библиотеке сценариев.

Реализован предиктивный контур, основанный на анализе временных рядов диагностических признаков, позволяющий прогнозировать развитие деградационных процессов и оценивать остаточный ресурс конструкции. Показано, что предложенная методика обеспечивает переход от порогового контроля к многомерному анализу состояния, повышает информативность данных мониторинга и обоснованность решений по управлению эксплуатационными рисками.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанной методики для повышения надежности и безопасности эксплуатации мостовых сооружений за счет раннего выявления дефектов и планирования ремонтных мероприятий на упреждающей основе.

Ключевые слова: предиктивное прогнозирование, предиктивная аналитика, мониторинг технического состояния, искусственные сооружения, мосты, напряженно-деформированное состояние, таксономический анализ, остаточный ресурс, дефектные сценарии

Для цитирования: Осетинский О. В., Лазарев Ю. Г., Белый А. А. Методика предиктивного прогнозирования при проведении мониторинга технического состояния искусственных сооружений // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 3 (80). С. 109–118. DOI 10.52170/1815-9265_2026_80_109.

Original article

Predictive forecasting methodology for monitoring the technical condition of artificial structures

Oleg V. Osetinsky^{1✉}, Yuri G. Lazarev², Andrey A. Bely³

^{1, 2} Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia

¹ 'Complex Systems and Networks', Saint-Petersburg, Russia

³ 'K2 Engineering', Moscow, Russia

³ Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan

¹ 89095847909@mail.ru✉

² lazarev-yurij@yandex.ru

³ andbeliy@mail.ru

Abstract. This paper proposes a methodology for predictive forecasting of the technical condition of artificial structures based on the integration of automated monitoring data, a reference numerical model, and a library of defect scenarios. The purpose of the methodology is to improve the reliability of determining the actual technical condition of a structure and the accuracy of forecasting its future change and remaining useful life. The approach is based on representing the structural state as a multidimensional feature vector of the stress-strain state, followed by the application of taxonomic analysis methods to assess proximity to reference and defective conditions.

An integral indicator – the taxonomic condition index – is introduced to quantitatively evaluate the degree of structural degradation and to identify transition states at early stages of defect development. A classification algorithm is developed to identify the most probable dominant defect type (corrosion, fatigue crack, bearing malfunction), to provide scenario-based localization and to estimate its parameters.

A predictive framework based on time series analysis of diagnostic features is implemented, enabling forecasting of degradation processes and estimation of the remaining service life. It is shown that the proposed methodology provides a transition from threshold-based monitoring to multidimensional state assessment, improves the informativeness of monitoring data, and enhances decision-making in infrastructure risk management.

The practical significance of the study lies in the applicability of the proposed methodology for improving the reliability and safety of bridge structures through early defect detection and proactive maintenance planning.

Keywords: predictive forecasting, predictive analytics, monitoring technical condition, artificial structures, bridges, stress-strain state, taxonomic analysis, remaining useful life, defect scenarios

For citation: Osetinsky O. V., Lazarev Yu. G., Bely A. A. Predictive forecasting methodology for monitoring the technical condition of artificial structures. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(80):109–118. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_80_109.

Введение

В условиях цифровизации инженерной инфраструктуры [1] и роста требований к надежности и безопасности объектов транспортного комплекса особую актуальность приобретает переход от реактивных стратегий управления техническим состоянием к проактивным. Одним из ключевых инструментов такого перехода является предиктивное прогнозирование (predictive analytics), представляющее собой совокупность методов анализа данных, математического моделирования и машинного обучения, направленных на выявление закономерностей деградации и прогнозирование будущих состояний технических систем.

Предиктивные методы широко применяются в железнодорожной отрасли [2–4], энергетике [5, 6], авиационной технике [7], военных системах связи [8], нефтегазовой отрасли [9], электротехнических и гидравлических системах [10, 11]. Современные исследования также направлены на интеграцию предиктивных моделей в системы искусственного интеллекта и цифровых двойников [12]. Общей тенденцией для всех указанных областей является переход от анализа отдельных параметров к комплексной обработке многомерных данных и формированию интегральных показателей технического состояния, что позволяет выявлять ранние стадии деградации и оценивать остаточный ресурс.

В области строительных конструкций данный подход реализуется в рамках Structural

Health Monitoring (SHM), предусматривающего сбор и анализ данных о состоянии конструкции. При этом основным ограничением современных систем мониторинга остается интерпретация больших массивов данных [13–22].

Традиционные методы анализа данных мониторинга [23], основанные на пороговых значениях контролируемых параметров, позволяют фиксировать уже сформировавшиеся отклонения, но недостаточно чувствительны к ранним стадиям повреждений, когда изменения носят скрытый характер и проявляются лишь в изменении структуры напряженно-деформированного состояния.

В настоящей работе под изменением структуры напряженно-деформированного состояния понимается устойчивое перераспределение не отдельно взятого параметра, а совокупности взаимосвязанных признаков: напряжений, деформаций и температурно обусловленных поправок в контрольных сечениях. Такое перераспределение проявляется, например, в изменении соотношений между усилиями в поясах, раскосах и опорных зонах фермы при одинаковом уровне внешней нагрузки. Поэтому ранний дефект может не приводить к превышению порогового значения отдельного датчика, но менять многомерный профиль отклика конструкции.

В этой связи актуальной задачей является разработка методик, обеспечивающих переход от порогового контроля к многомерному анализу состояния конструкции с учетом возмож-

ных сценариев ее деградации. Такой подход предполагает рассмотрение объекта как динамической системы, способной развиваться по различным траекториям повреждения, и требует использования предиктивных моделей, интегрирующих данные мониторинга, расчетные модели и знания о типовых дефектах.

Особое значение данная задача приобретает для искусственных сооружений, в частности железнодорожных мостов, эксплуатация которых сопровождается воздействием переменных нагрузок, климатических факторов и процессов усталостного разрушения. Высокая стоимость отказов и потенциальные последствия аварий обуславливают необходимость раннего выявления дефектов и обоснованного прогнозирования остаточного ресурса.

Целью работы является повышение достоверности определения фактического технического состояния искусственных сооружений и точности прогнозирования его изменения в будущем за счет разработки и обоснования методики, интегрирующей данные автоматизированного мониторинга, эталонную расчетную модель и библиотеку дефектных сценариев. Достижение указанной цели позволит обеспечить раннее выявление деградационных процессов, оценку остаточного ресурса конструкции и повышение обоснованности решений по управлению эксплуатационными рисками.

Теоретические исследования

Методика основана на сопоставлении фактических измерений автоматизированной системы контроля и мониторинга инженерных конструкций с эталонной расчетной моделью и библиотекой дефектных моделей, а также на

таксономическом анализе вектора параметров напряженно-деформированного состояния.

Таксономический анализ используется для классификации состояний объектов в многомерном признаковом пространстве на основе оценки расстояний до центров классов. Теория таксономического анализа позволяет на множестве размещенных на плоскости объектов выделить локальные неоднородности, таксоны, таким образом, чтобы сумма расстояний от объектов таксонов до центров таксонов была минимальной по всем таксонам. При преобразовании множества критериев в один необходимо определять весовые коэффициенты или другие функции влияния отдельных критериев на общий критерий. Также при формулировке задачи оптимизации требуется вводить ограничения, которые имеют неформальный характер.

Ниже приведен практический метод предиктивной аналитики для мониторинга мостового сооружения в виде фермы по данным о напряженно-деформированном состоянии (схему общей архитектуры можно увидеть на рис. 1), где сравниваются эталонная (исправная) модель и модели с типовыми дефектами: трещинами, коррозией и заклиниванием опорных частей.

1. Формирование базы сценариев.

Строится эталонная конечно-элементная модель фермы (без повреждений), затем формируется библиотека дефектных сценариев с параметризацией: положение и длина трещины, степень потери сечения от коррозии, тип и степень ограничения подвижности опор.

Эталонная модель формируется как параметризованная расчетная модель, калиброван-

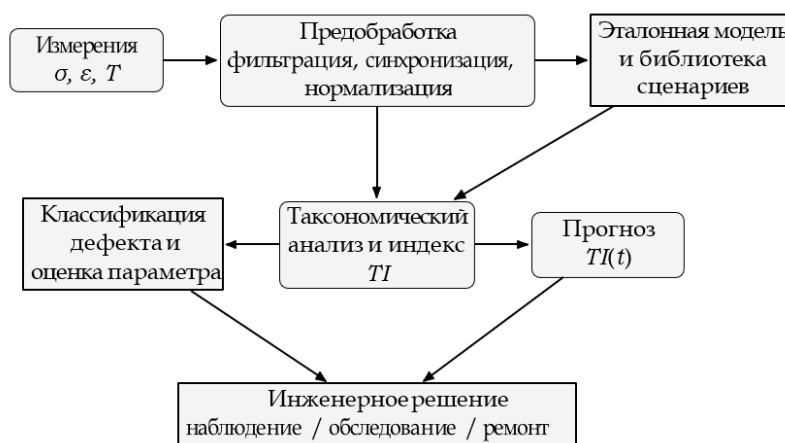


Рис. 1. Схема общей архитектуры методики предиктивной аналитики

ная по данным приемочных испытаний и раннего «здорового» периода эксплуатации. Учитывается геометрия, граничные значения, температурные показатели и статистика временной нагрузки.

Библиотека дефектных классов включает сценарии коррозии, усталостного разрушения и заклинивания опорных частей.

Под статистикой временной нагрузки в данной методике понимается совокупность распределений, описывающих эксплуатационное воздействие подвижной нагрузки на сооружение: интенсивность прохода транспортных единиц, массу и осевые нагрузки, скорость, интервалы между проходами, повторяемость характерных схем загрузки, а также сезонную изменчивость этих параметров. В эталонной модели указанная статистика используется для формирования набора расчетных загрузок и их весов, для задания доверительных диапазонов отклика исправной конструкции и для отделения изменений, вызванных эксплуатационной нагрузкой, от изменений, связанных с развитием дефекта.

2. Набор диагностических признаков напряженно-деформированного состояния.

Для каждого сценария и для реальных измерений под нагрузкой формируется вектор признаков:

$x = (\sigma_1, \dots, \sigma_m, \varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n, t_1, \dots, t),$ (1)
где σ – напряжения в контрольных сечениях; ε – деформации по тензодатчикам; t – температура в узлах.

Для устойчивости к шуму выполняется фильтрация, синхронизация по времени и усреднение по окнам нагружения.

Контрольные сечения выбираются не произвольно, а по совокупности инженерных и расчетных критериев: расположению зон максимальных усилий по эталонной модели, чувствительности отклика к моделируемым де-

фектам, доступности установки и обслуживания датчиков, а также необходимости различать дефекты разной природы. В демонстрационном примере выбраны три сечения: нижний пояс в зоне максимального изгиба; раскос панели, чувствительный к потере площади сечения при коррозии; приопорный узел или соседнее сечение, чувствительное к ограничению подвижности опорной части. Количество сечений принято как минимальный демонстрационный набор, при практическом внедрении размерность вектора признаков увеличивается в соответствии со схемой мониторинга конкретного сооружения.

3. Нормализация и таксономические состояния.

Признаки стандартизируются:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \mu_j}{s_j}, \quad (2)$$

где μ_j и s_j – среднее и стандартное отклонение признака j по обучающей выборке.

Далее вычисляется расстояние до эталона и до центров дефектных моделей (например, евклидово или Махаланобиса):

$$d_i^{(0)} = \|z_i - z_{ref}\|, \quad d_i^{(c)} = \|z_i - z_c\|, \quad (3)$$

где $c \in \{\text{трещина, коррозия, заклинивание}\}$.

4. Таксономический индекс технического состояния.

Вводится интегральный индекс близости к исправному состоянию:

$$TI_i = 1 - \frac{d_i^{(0)}}{d^*}, \quad d^* = \bar{d} + 2s_d, \quad (4)$$

где $\bar{d}$ и s_d – статистики расстояний для исправных режимов.

Чем меньше TI_i , тем выше риск деградации (рис. 2). Для интерпретации можно использовать следующие зоны:

- норма ($TI \geq 0,8$),
- предупреждение ($0,6 \leq TI < 0,8$),
- дефект ($TI < 0,6$).

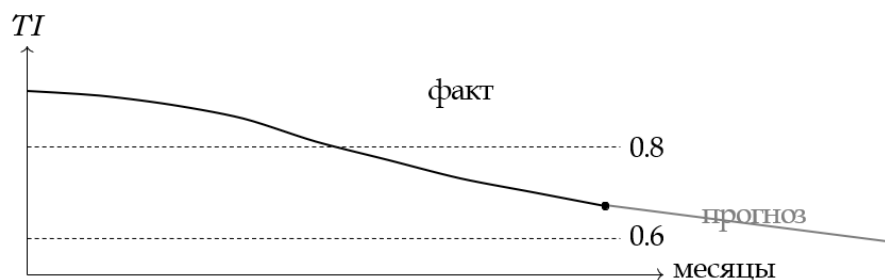


Рис. 2. Динамика индекса технического состояния

Указанные границы не являются универсальными нормативными константами, а представлены примером объектно ориентированной калибровки. В практической реализации они назначаются по данным исправного периода эксплуатации, результатам расчетного моделирования и проверки разделимости дефектных сценариев. Зона «норма» должна включать доверительный диапазон исправных наблюдений с учетом эксплуатационной и температурной изменчивости, зона «предупреждение» соответствует устойчивому выходу вектора признаков за этот диапазон без однозначного сближения с дефектным таксоном, а зона «дефект» назначается при устойчивом уменьшении расстояния до одного из дефектных классов относительно расстояния до эталона. Поэтому для другого сооружения значения 0,8 и 0,6 подлежат повторной калибровке.

5. Таксономическая классификация типа дефекта.

После фиксации отклонения от эталона тип дефекта определяется по минимальному расстоянию:

$$\hat{c} = \arg \min_i d_i^{(c)}. \quad (5)$$

Дополнительно оценивается степень повреждения (например, длина трещины или процент коррозии) через регрессию по подмножеству наиболее информативных признаков.

Результат классификации следует трактовать как выбор наиболее вероятного дефектного сценария из заданной библиотеки, а не как абсолютно однозначное заключение по одному измеренному параметру. Одному и тому же значению отдельного контролируемого параметра могут соответствовать различные дефекты, поэтому решение принимается по многомерному вектору признаков, по индексу уверенности и по устойчивости результата во времени. Локализация дефекта обеспечивается тем, что каждый сценарий библиотеки содержит пространственную привязку: элемент, панель фермы, узел или опорную часть. Если наиболее близким оказывается класс «усталостная трещина», первоочередному обследованию подлежит тот элемент или узел, чей сценарий имеет минимальное расстояние до измеренного вектора; при низком индексе уверенности результат рассмат-

ривается как неоднозначный и требует дополнительного контроля или инструментального обследования.

6. Предиктивный контур (прогноз).

По временным рядам индекса TI_i и ключевым признакам напряженно-деформированного состояния строится прогноз деградации (например, ARIMA/LSTM/градиентный бустинг):

$$TI(t + \Delta t) = f(TI(t), TI(t - 1), x(t)). \quad (6)$$

По моменту пересечения порога определяется остаточный ресурс до перехода в опасную зону.

Результаты исследования

Для проверки работоспособности методики рассмотрен демонстрационный расчетный пример ферменного пролетного строения, оснащенного датчиками напряжений, деформаций и температуры в трех контрольных сечениях. Исходные данные выбраны исходя из типовой схемы мониторинга мостового сооружения и наиболее характерных для ферменных конструкций дефектных сценариев: коррозионной потери площади элемента, усталостного снижения жесткости вследствие трещины и нарушения работы опорной части. Такой набор позволяет показать различие дефектов, близких по влиянию на отдельные параметры, но отличающихся по многомерному профилю отклика.

За контролируемый параметр принято текущее состояние конструкции при испытании под нагрузкой, формируем вектор признаков:

$$x = (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, t_1, t_2, t_3), \quad (7)$$

где σ_i – напряжения в контрольных сечениях, МПа; ε_i – деформации по тензодатчикам, мкм/м; t_i – температуры в узлах, °С.

Первое сечение соответствует зоне максимального изгиба нижнего пояса, второе – раскосу панели с повышенной чувствительностью к коррозионной потере площади, третье – опорной зоне, в которой изменение условий опирания сильнее всего влияет на перераспределение усилий. Три сечения использованы для компактности иллюстрации; при обследовании реального объекта число сечений и датчиков определяется проектом мониторинга и результатами анализа чувствительности.

Библиотека дефектных классов (медианные центры таксонов в нормированных координатах) представлена в таблице.

Задача аналитики состояния по измеренным значениям

По вектору измерений x_{meas} требуется определить соответствие состояния одному из дефектных классов: D1, D2, D3. Для этого сравниваем нормированный вектор z_{meas} с медианными центрами C_r (рис. 3) и вычисляем расстояния:

$$d_r = \|z_{meas} - C_r\|_2, \quad r \in \{1, 2, 3\}. \quad (8)$$

Правило решения

$$\hat{r} = \arg \min_i d_r, \text{ класс состояния} = D_{\hat{r}}.$$

Для количественной интерпретации используем индекс уверенности (чем ближе к единице, тем надежнее выбор):

$$q = 1 - \frac{d_{\min}}{d_{2nd}}, \quad (9)$$

где $d_{\min}$ – минимальное расстояние; d_{2nd} – второе по величине близости (второе минимальное).

В рассматриваемом примере нормированный измеренный вектор принят равным $z_{meas} = (0,12; 0,06; 0,09; 0,15; 0,10; 0,11; 0,02; 0,02; 0,01)$.

Евклидовы расстояния до медианных центров составляют: $d_{D1} = 0,024$; $d_{D2} = 0,133$; $d_{D3} = 0,168$.

Минимальное расстояние соответствует классу D1, а индекс уверенности равен $q = 1 - 0,024/0,133 \approx 0,82$. Следовательно, текущее состояние наиболее соответствует дефектному классу D1 – прогрессирующей коррозии раскоса, а оценка параметра дефекта находится на уровне $\alpha \approx 10...12\%$ (рис. 4). Выбор D1 объясняется тем, что измеренный профиль одновременно показывает рост признаков, связанных с перераспределением усилий в раскосе, и не демонстрирует характерного для заклинивания опоры увеличения температурно-зависимых и приопорных признаков. При этом вывод о коррозии следует рассматривать как основание для адресного обследования указанного раскоса, а не как замену визуально-инструментальной проверки.

Длительность наблюдения 12 месяцев на рис. 4 выбрана как минимальный интервал,

Медианные центры таксонов в нормированных координатах

Класс	Параметр дефекта	Пример центра C_r
D1	Коррозия раскоса, $\alpha = 12\%$ потери площади	0,11; 0,05; 0,08; 0,16; 0,09; 0,10; 0,02; 0,02
D2	Усталостная трещина, эквивалентная потеря жесткости $\beta = 18\%$	0,07; 0,03; 0,15; 0,10; 0,06; 0,19; 0,01; 0,01
D3	Заклинивание опоры, ограничение перемещения $\gamma = 0,6$	0,18; 0,16; 0,05; 0,20; 0,18; 0,07; 0,06; 0,05

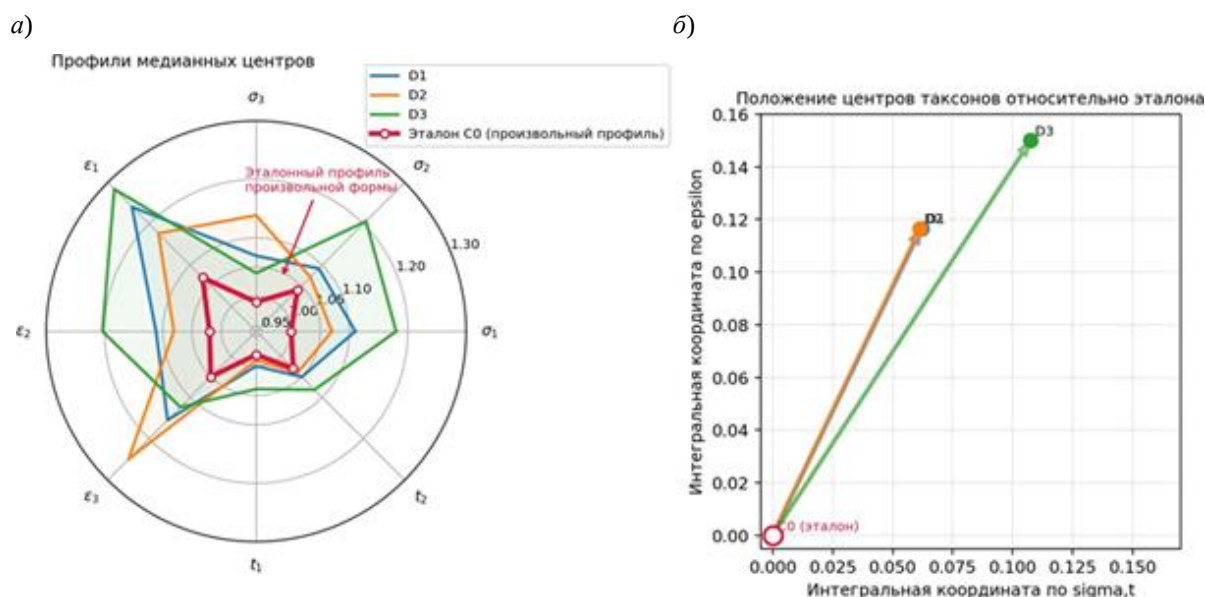


Рис. 3. Динамика индекса технического состояния:

а – профили медианных центров D1–D3 по нормированным признакам; б – их положение относительно эталона C0 в интегральной проекции признакового пространства

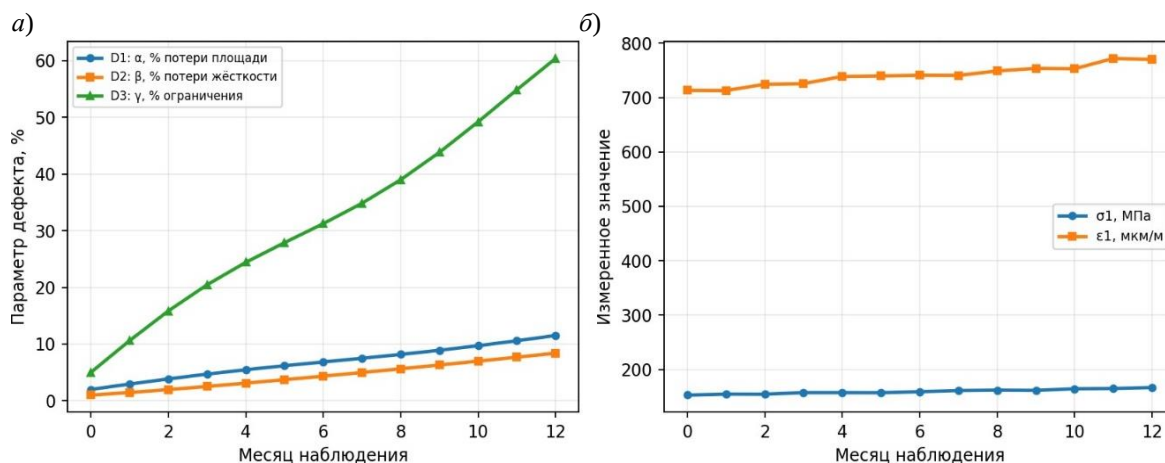


Рис. 4. Примерные графики развития дефектов D1–D3 (а) и соответствующей реакции измеряемых признаков (б)

охватывающий полный годовой цикл температурных воздействий и сезонной изменчивости временной нагрузки. Это позволяет отделить регулярную сезонную составляющую от устойчивого тренда деградации. При наличии архива мониторинга за несколько лет тот же алгоритм может быть применен к более длинному временному ряду, что повысит устойчивость прогноза остаточного ресурса.

Заключение

Разработана и обоснована методика предиктивного прогнозирования технического состояния искусственных сооружений, направленная на повышение достоверности определения фактического технического состояния и точности прогноза его изменения во времени. Методика основана на интеграции данных автоматизированного мониторинга, эталонной расчетной модели и библиотеки дефектных сценариев.

Предложенный подход обеспечивает переход от порогового контроля к многомерной

классификации состояния конструкции по вектору признаков напряженно-деформированного состояния. Введенный таксономический индекс позволяет количественно оценивать степень деградации, идентифицировать доминирующий дефектный сценарий и прогнозировать развитие повреждений.

Уточнено, что идентификация дефекта выполняется как вероятностный выбор наиболее близкого сценария из заранее сформированной и пространственно размеченной библиотеки. Поэтому результат методики должен использоваться для назначения адресного обследования и уточняющей диагностики, особенно в случаях низкого индекса уверенности или близких состояний до нескольких дефектных классов.

Реализация предиктивного контура обеспечивает возможность оценки остаточного ресурса и повышения обоснованности решений по управлению эксплуатационными рисками мостовых сооружений.

Список источников

1. Шестакова Е. Б. Цифровой инжиниринг. Основы и примеры из практики : монография. Москва : Ай Пи Ар Медиа, 2024. 191 с.
2. Ефанов Д. В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : монография / Петербургский университет путей сообщения. Санкт-Петербург, 2016. 171 с.
3. Федотов М. В. Предиктивная диагностика оборудования тепловоза на основе интеллектуального анализа данных : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Федотов Михаил Владимирович ; ПГУПС. Санкт-Петербург, 2021. 205 с.
4. Гаранин М. А., Дмитриев В. В., Верстина Ю. Д. Управление железнодорожными станциями на основе данных // Транспортное дело России. 2025. № 5. С. 279–285. EDN EYRAGY.
5. Кондрашова Ю. Н., Третьяков А. М., Шалимов А. В. Составление прогнозов применительно к воздушным линиям электропередач с помощью предиктивной аналитики // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2024. № 1 (100). С. 20–30. DOI 10.37493/2307-907X.2024.1.2.

6. Левин В. М., Боярова Д. А. Распределенная система предиктивного управления состоянием оборудования электрических сетей по наработке на дефект // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2025. Т. 27, № 3. С. 123–134. DOI 10.30724/1998-9903-2025-27-3-123-134.
7. Волков И. А., Бобин К. Н. Методика предиктивного прогнозирования дефектов при технической эксплуатации самолета // Наука. Промышленность. Оборона : труды XXIV Всероссийской научно-технической конференции : в 4 томах / под редакцией А. В. Гуськова. Новосибирск, 2023. С. 216–218. EDN LJQXMK.
8. Шмидт А. А., Косырев А. В. Анализ научно-методического аппарата диагностики и контроля, мониторинга и прогнозирования технического состояния военной техники связи // Техника средств связи. 2023. № 4 (164). С. 81–92. DOI 10.24412/2782-2141-2023-4-81-92.
9. Захаров О. В., Захаров И. В., Бочаров Н. В. Использование предиктивной аналитики и машинного обучения для прогноза аварий в процессе строительства нефтяных и газовых скважин // Современные проблемы машиноведения : сборник научных трудов : в 2 частях. Гомель, 2025. С. 163–167. EDN LBFKAA.
10. Помелов В. Н., Андреев В. В. Разработка методики прогнозирования и верификации гидравлического сопротивления для каналов различной геометрии на основании предиктивной модели // Ядерные технологии: от исследований к внедрению : сборник материалов научно-практической конференции. 2018. С. 42–43. EDN VNRVST.
11. Аунг Ч. М., Портнов Е. М., Подопригора В. Д. Разработка методики предиктивного анализа надежности электротехнических устройств // Перспективы науки. 2025. № 6 (189). С. 64–70. EDN LTYZYY.
12. Попова Е. С., Нефедов А. В. Интеграция методики пошагового прогнозирования состояния сложных технических объектов в системы искусственного интеллекта // Искусственный интеллект. Теория и практика. 2025. № 4 (12). С. 87–89. EDN WXRKPV.
13. Бушуев С. В., Ускова М. Л., Попов А. Н. Оценка влияния систем технической диагностики и мониторинга на надежность устройств железнодорожной автоматики и телемеханики в эксплуатации // Транспорт Урала. 2014. № 3 (42). С. 68–72. EDN SVNLDD.
14. Донец Н. А., Афанасьев В. С. Оценка экономической эффективности мониторинга технического состояния мостовых сооружений. Часть 1 // Транспортное строительство. 2016. № 1. С. 15–17. EDN VOOPTV.
15. Донец Н. А., Афанасьев В. С. Экономическая эффективность мониторинга технического состояния мостовых искусственных сооружений. Часть 2 // Транспортное строительство. 2016. № 2. С. 2–4. EDN VOOPLYV.
16. Ефанов Д. В. Становление и перспективы развития систем функционального контроля и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики // Автоматика на транспорте. 2016. Т. 2, № 1. С. 124–148. EDN VXJDHV.
17. Яшнов А. Н. Методология сквозного мониторинга технического состояния мостовых сооружений в их жизненном цикле : специальность 2.1.8 «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Яшнов Андрей Николаевич ; СГУПС. Новосибирск, 2023. 376 с.
18. Гусев Г. Н. Деградация датчиков в системе интеллектуального деформационного мониторинга и метод ее диагностики // Механика деформируемого твердого тела в проектировании материалов и конструкций. Пермь, 2024. С. 136–137. EDN CLOJBF.
19. Махонько А. А., Лазарев Ю. Г., Антонюк А. А. Технический аспект работы акселерометров в составе системы мониторинга инженерных конструкций вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в г. Санкт-Петербурге // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10, № 3. С. 401–418. DOI 10.17816/transsyst630992.
20. Кочетков А. В., Валиев Ш. Н. Рискориентированный подход при эксплуатации мостов // Транспорт Российской Федерации. 2024. № 4 (113). С. 25–29. EDN LIQEXA.
21. Махонько А. А., Лазарев Ю. Г. Оценка работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в г. Санкт-Петербурге // Путевой навигатор. 2025. № 62 (88). С. 28–34. EDN ZQXSOZ.
22. Белый А. А., Павлов Е. И. Надежность систем мониторинга объектов транспортной и гражданской инфраструктуры // Инновационные транспортные системы и технологии. 2026. Т. 12, № 1. С. 76–95. DOI 10.17816/transsyst701828.
23. Особенности и современные методы обеспечения контроля технического состояния искусственных сооружений с пролетными строениями в виде железнодорожных ферм / О. В. Осетинский, А. А. Белый, А. А. Антонюк, Г. В. Осадчий // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 4 (71), спецвыпуск. С. 55–65. DOI 10.52170/1815-9265_2024_71_55.

References

1. Shestakova E. B. Digital Engineering. Fundamentals and practical examples: monograph. Moscow: IPR Media; 2024. 191 p. (In Russ.).
2. Efanov D. V. Functional testing and monitoring of railway automation and telemechanics devices: monograph. Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University. St. Petersburg; 2016. 171 p. (In Russ.).
3. Fedotov M. V. Predictive diagnostics of diesel locomotive equipment based on intelligent data analysis. Specialty 05.22.07 'Railway Rolling Stock, Train Traction, and Electrification'. Dissertation for the Degree of Candidate of Engineering. Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University. St. Petersburg; 2021. 205 p. (In Russ.).
4. Garanin M. A., Dmitriev V. V., Verstina Yu. D. Data-driven railway station management. *Transport Business of Russia*. 2025;(5):279–285. (In Russ.). EDN EYRAGY.
5. Kondrashova Yu. N., Tretyakov A. M., Shalimov A. V. Forecasting for overhead power transmission lines using predictive analytics. *Bulletin of the North Caucasus Federal University*. 2024;(100):20–30. (In Russ.). DOI 10.37493/2307-907X.2024.1.2.
6. Levin V. M., Boyarova D. A. Distributed system for predictive condition monitoring of electrical grid equipment based on Time-to-Failure. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Energy Sector Problems*. 2025;27(3):123–134. (In Russ.). DOI 10.30724/1998-9903-2025-27-3-123-134.
7. Volkov I. A., Bobin K. N. Methodology for predictive forecasting of defects during aircraft technical operation. *Science. Industry. Defense. Proceedings of the XXIV All-Russian Scientific and Technical Conference: in 4 volumes*. Edited by A. V. Guskov A.V. Novosibirsk; 2023. P. 216–218. (In Russ.). EDN LJQXMK.
8. Schmidt A. A., Kosyrev A. V. Analysis of the scientific and methodological framework for diagnostics, control, monitoring, and forecasting the technical condition of military communication equipment. *Communication Equipment Technology*. 2023;(164):81–92. (In Russ.). DOI 10.24412/2782-2141-2023-4-81-92.
9. Zakharov O. V., Zakharov I. V., Bocharov N. V. Use of predictive analytics and machine learning to forecast accidents during oil and gas well construction. *Modern Problems of Mechanical Engineering. Proceedings in 2 parts*. Gomel; 2025. P. 163–167. (In Russ.). EDN LBFKAA.
10. Pomelov V. N., Andreev V. V. Development of a methodology for forecasting and verifying hydraulic resistance in channels of various geometries based on a predictive model. *Nuclear Technologies: From Research to Implementation. Proceedings of the Scientific and Practical Conference*. 2018. P. 42–43. (In Russ.). EDN VNRVST.
11. Aung Ch. M., Portnov E. M., Podoprigora V. D. Development of a methodology for predictive reliability analysis of electrical devices. *Prospects of Science*. 2025;(189):64–70. (In Russ.). EDN LTYZYY.
12. Popova E. S., Nefedov A. V. Integration of the step-by-step state forecasting methodology for complex technical objects into artificial intelligence systems. *Artificial Intelligence. Theory and Practice*. 2025;(12):87–89. (In Russ.). EDN WXRKPV.
13. Bushuev S. V., Uskova M. L., Popov A. N. Impact of technical diagnostics and monitoring systems on the reliability of railway automation and telemechanics devices during operation. *Transport of the Urals*. 2014;(42):68–72. (In Russ.). EDN SVNLDD.
14. Donets N. A., Afanasyev V. S. Assessment of the economic efficiency of monitoring the technical condition of bridge structures. Part 1. *Transport Construction*. 2016. No. 1. P. 15–17. (In Russ.). EDN VOOPTV.
15. Donets N. A., Afanasyev V. S. Economic efficiency of monitoring the technical condition of bridge structures. Part 2. *Transport Construction*. 2016;(2):2–4. (In Russ.). EDN VOOPYV.
16. Efanov D. V. Emergence and development prospects of functional control and monitoring systems for railway automation and telemechanics devices. *Automation in Transport*. 2016;2(1):124–148. (In Russ.). EDN VVJDHV.
17. Yashnov A. N. Methodology for end-to-end monitoring of the technical condition of bridge structures throughout their lifecycle. Specialty 2.1.8 'Design and construction of roads, subways, airfields, bridges, and transport tunnels'. Dissertation for the degree of Doctor of Engineering. Siberian Transport University. Novosibirsk; 2023. 376 p. (In Russ.).
18. Gusev G. N. Sensor degradation in an intelligent deformation monitoring system and a method for its diagnosis. *Mechanics of Deformable Solids in Materials and Structures Design*. Perm; 2024. P. 136–137. (In Russ.). EDN CLOJBF.
19. Makhonko A. A., Lazarev Yu. G., Antonyuk A. A. Technical aspects of accelerometer operation within the structural health monitoring system of the cable-stayed bridge over the Petrovsky Canal (part of the Western High-Speed Diameter Highway in St. Petersburg). *Innovative Transport Systems and Technologies*. 2024;10(3):401–418. (In Russ.). DOI 10.17816/transsyst630992.
20. Kochetkov A. V., Valiev Sh. N. Risk-based approach to bridge operation. *Transport of the Russian Federation*. 2024;(113):25–29. (In Russ.). EDN: JIQEXA.
21. Makhonko A. A., Lazarev Yu. G. Performance assessment of the structural health monitoring system for the cable-stayed bridge over the Petrovsky Canal (part of the Western High-Speed Diameter Highway in St. Petersburg). *Putevoy Navigator*. 2025;(88):28–34. (In Russ.). EDN ZQXSOZ.

22. Bely A. A., Pavlov E. I. Reliability of monitoring systems for transport and civil infrastructure facilities. *Innovative Transport Systems and Technologies*. 2026;12(1):76–95. (In Russ.). DOI 10.17816/transsyst701828.

23. Osetinsky O. V., Bely A. A., Antonyuk A. A., Osadchy G. V. Features and modern methods for monitoring the technical condition of artificial structures with railway truss spans. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(71):55–65. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_71_55.

Информация об авторах

О. В. Осетинский – начальник отдела ООО «Комплексные Системы и Сети», аспирант Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства Инженерно-строительного института Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Ю. Г. Лазарев – доктор технических наук, профессор, директор Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства Инженерно-строительного института Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

А. А. Белый – доктор технических наук, академик Российской академии транспорта, академик Международной академии транспорта, технический директор ООО «K2 Инжиниринг», профессор кафедры «Мосты и тоннели» Ташкентского государственного транспортного университета.

Information about the authors

O. V. Osetinsky – Head of the Department at Complex Systems and Networks LLC, Postgraduate Student at the Higher School of Industrial, Civil, and Road Construction, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

Yu. G. Lazarev – Doctor of Engineering, Professor, Director of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

A. A. Bely – Doctor of Engineering, Academician of Russian Transport Academy, Academician of International Transport Academy, Technical Director K2 Engineering LLC, Professor of the Bridges and Tunnels Department, Tashkent State Transport University.

Статья поступила в редакцию 15.05.2026; одобрена после рецензирования 25.06.2026; принята к публикации 08.09.2026.

The article was submitted 15.05.2026; approved after reviewing 25.06.2026; accepted for publication 08.09.2026.

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



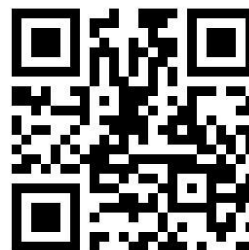
vestniksgups@sibgups.ru



+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 22.09.2026. Дата выхода в свет 24.09.2026
Тираж 350 экз. Формат 60×84/8
Объем 14,1 уч.-изд. л., 15,0 усл.-печ. л. Заказ № 4110

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. № 3 (80). 1–120