

Главный редактор Д. П. Кононов, докт. техн. наук, доцент
Editor-in-chief D. Kononov, Dr. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
Заместитель главного редактора А. М. Евстафьев, д-р техн. наук, профессор
Deputy chief editor A. Evstafey, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
Научный редактор Т. С. Титова, д-р техн. наук профессор
Scientific Editor T. Titova, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
Перевод на английский язык И. Л. Лютомская
English translation Irina L. Liutomskaia
Литературное редактирование и корректура Н. В. Юдина
Editing and proofreading Nadezhda V. Yudina
Верстка И. Г. Иваньшина
Layout Irina G. Ivanshina

Учредитель

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

Издатель

Общество с ограниченной ответственностью «Издательский Центр РИОР» по договору № ЭА78751 от 28.12.2024

Founder

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

Publisher

Limited Liability Company "Publishing Center RIOR", under contract N ЭА78751 dated 28.12.2024

Контакты

190031, СПб., Московский пр., 9, тел. (812) 457-85-36;
e-mail: brni@pgups.ru;

127214, г. Москва, ул. Полярная, д. 31В, стр. 1, оф. 402

Contacts

190031, St. Petersburg, Moskovskiy pr., 9, (812) 457-85-36;
e-mail: brni@pgups.ru;

127214, Russia, Moscow, Polyarnaya str., 31Bc1, office 402

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

ЭЛ № ФС 77-45490 от 22.06.2011 выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Mass media registration certificate number

ЭЛ N ФС 77-45490 dd. 22.06.2011 issued by the The Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications

Журнал зарегистрирован в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

The Journal is registered in the Russian Science Citation Index (RSCI)

Журнал имеет институт рецензирования

The Journal has the Peer-review division

Журнал распространяется через Интернет без ограничений и по адресно-целевой подписке через редакцию

The Journal is distributed via Internet for free and by subscription via Editorial office

Минимальные системные требования

Тип компьютера, процессор, сопроцессор, частота: Pentium IV и выше; оперативная память (RAM): 256 Мб и выше; необходимо на винчестере: не менее 64 Мб; ОС MacOS, Windows (XP, Vista, 7); видеосистема: встроенная; дополнительное ПО: Adobe Reader версия от 7.X или аналог. Защита от незаконного распространения: реализуется встроенными средствами Adobe Acrobat

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ INTERNATIONAL EDITORIAL

Валинский Олег Сергеевич, канд. техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия, председатель Совета
Oleg Valinskiy, PhD Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia, Chairman of Editorial board

Хамидов Отабек Рустамович, д-р техн. наук, доц., Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Республика Узбекистан
Otabek Khamidov, D. Eng. Sci., Associate Professor, Tashkent State Technical University, Tashkent, The Republic of Uzbekistan

Вэйли Ли, профессор, Институт электрических машин и приборов, Пекинский университет Цзяотун, Пекин, Китай
Weili Li, PhD Degree and Professor, School of Electrical Engineering, Director of Institute of Electrical Machinery and Appliances, Beijing Jiaotong University, Beijing, China

Ли Фушэн, профессор, Чжэнчжоуский железнодорожный профессионально-технический колледж, Чжэнчжоу, Китай
Li Fusheng, PhD, Professor, Zhengzhou Railway Vocational & Technical College, Zhengzhou, China

Поляк Милош, профессор, Жилинский университет, Жилин, Словацкая Республика
Milos Poliak, Ing. PhD, Professor, University of Zilina, Zilina, Slovak Republic

Стыскала Витезслав, профессор, Остравский технический университет, Острава, Чешская Республика
Vitezslav Styskala, PhD, Associate Professor, Technical University of Ostrava, Ostrava, Czech Republic

Чжан Чжунъян, профессор, Чжэнчжоуский железнодорожный профессионально-технический колледж, Чжэнчжоу, Китай
Zhang Zhongyang, University Degree, Professor, Zhengzhou Railway Vocational & Technical College, Professor, Secretary of the School of Locomotives and Rolling Stock, Zhengzhou, China

Бельтюков Владимир Петрович, д-р техн. наук, доц., ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Vladimir Belyukov, D. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Блажко Людмила Сергеевна, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Liudmila Blazhko, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Бороненко Юрий Павлович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Yuriy Boronenko, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Грачев Владимир Васильевич, д-р техн. наук, доц., ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Vladimir Grachev, D. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Грищенко Александр Васильевич, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Alexander Grishchenko, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Дудкин Евгений Павлович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Evgeniy Dudkin, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Евстафьев Андрей Михайлович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Andrey Evstafey, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Журавлева Наталья Александровна, д-р экон. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Natalya Zhuravleva, D. Econ. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Ким Константин Константинович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Konstantin Kim, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Колпачкьян Павел Григорьевич, д-р техн. наук, доц., ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Pavel Kolpakhchyan, D. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Лепидус Лариса Владимировна, д-р экон. наук, профессор, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
Larisa Lapidus, D. Econ. Sci., Professor, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Никитин Александр Борисович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Alexander Nikitin, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Никитин Виктор Валерьевич, д-р техн. наук, доц., ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Victor Nikitin, D. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Покровская Оксана Дмитриевна, д-р техн. наук, доц., ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Oksana Pokrovskaya, D. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Пудовиков Олег Евгеньевич, д-р техн. наук, доц., РУТ, Москва, Россия
Oleg Pudovikov, D. Eng. Sci., Associate Professor, Russian University of Transport, Moscow, Russia

Рачек Светлана Витальевна, д-р экон. наук, профессор, УрГУПС, Екатеринбург, Россия
Svetlana Rachech, D. Econ. Sci., Professor, Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg, Russia

Титова Тамила Семеновна, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Tamila Titova, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Штыков Валерий Иванович, член-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Valerij Shtykov, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ, ПРЕДЛАГАЕМЫМ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ «БЮЛЛЕТЕНЬ РУЗУЛЬТАТОВ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ»

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ И УСЛОВИЯ

1.1 Тема и содержание представляемой для публикации статьи должны соответствовать профилю журнала, обладать научной новизной и представлять интерес для специалистов.

1.2 Статьи, ранее опубликованные или переданные в другие издания, в журнал не принимаются.

1.3 Результаты исследований должны соответствовать одному из научных направлений: Транспортные системы, Энергетика и электротехника, Экономика.

1.4 Нижеперечисленные материалы предоставляются в электронном виде в одном архивном файле (zip или rar):

Файл 1 – рукопись научной статьи в формате MS Word.

Файл 2 – первая страница рукописи, подписанная автором (авторами).

Файл 3 – согласие на обработку персональных данных, заверенное личной подписью, в сканированном виде.

Файл 4 – информация об авторах:

- ФИО полностью,
- дата рождения,
- место работы, должность,
- ученая степень и звание,
- паспортные данные (серия, номер, кем и когда выдан),
- e-mail, телефон,
- адрес.

Файл 5 – название статьи, аннотация, ключевые слова, библиографический список на английском языке в формате MS Word.

Файл 6 – экспертное заключение о возможности опубликования рукописи в открытом доступе, заверенное по месту обучения или работы, в сканированном виде.

Файл 7 – рецензия научного руководителя (для студентов-исследователей, магистров, аспирантов и соискателей ученых степеней).

Файл 8 – лицензионный договор.

1.5 Все рукописи проходят рецензирование (внешняя экспертная оценка).

В случае отрицательного отзыва рукопись возвращается автору на доработку. В случае повторного отрицательного отзыва статья отклоняется.

После получения положительной рецензии с рекомендацией к публикации рукопись передается в издательство и проходит предпечатную подготовку.

ТРЕБОВАНИЯ К ТЕКСТУ

Объем статьи – не менее 8 и не более 15 страниц при наборе текста в формате Word 14-м кеглем через одинарный интервал.

На первой странице рукописи помещаются УДК, фамилии авторов (с указанием места обучения или работы), название статьи, аннотация и ключевые слова. Текст должен содержать введение, озаглавленные разделы, заключение.

Формулы должны быть набраны шрифтом Times New Roman в тексте статьи или в программе Math Type. Буквы латинского алфавита в тексте и формулах набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов – обычным шрифтом. Нумеровать нужно только те формулы, на которые есть ссылки в тексте.

Формат страницы – А4; каждое поле – 2,5 см; абзацный отступ – 1 см; размер шрифта 14, выравнивание по левому краю; автор (авторы) с указанием места обучения или работы – размер шрифта 14, полужирное начертание, выравнивание по левому краю; название рукописи – размер шрифта 14, строчные буквы, полужирное начертание, выравнивание по левому краю; аннотация, ключевые слова – размер шрифта 12, выравнивание по ширине.

Требуемый объем **аннотации** – 200–250 слов. В аннотации должны быть указаны цель, методы, результаты, практическая значимость работы.

Библиографический список приводится в конце статьи и составляется по мере упоминания работ в тексте. Ссылки на литературу в тексте приводятся в квадратных скобках.

Рисунки, графики и таблицы должны иметь номер и заголовок (размер шрифта 12, выравнивание по центру).

Внимание! Рисунки и формулы не должны быть сканированными!

Фотографии предоставляются в двух вариантах: в тексте статьи и в виде отдельных файлов TIFF и JPEG без сжатия. Название файла должно соответствовать подрисуночной подписи. Сканирование материалов из альбомов, журналов, буклетов, газет и книг влечет за собой сильное понижение качества изображения. Используйте функцию Descreen. Если Вы сканируете фото самостоятельно, выставляйте разрешение 300 dpi (большее не имеет смысла, меньшее приведет к понижению качества). То же самое касается рисунков, графиков и диаграмм, созданных в CorelDRAW и Illustrator. Помещайте в файл в формате Word рисунки только в качестве preview-версии, не забывая прилагать отдельно исходники.

Важная информация. Настоящие требования могут быть изменены без оповещения авторов. Неисключительные права на все материалы, опубликованные на сайте журнала, кроме оговоренных случаев, принадлежат ФГБОУ ВО ПГУПС. Все материалы, авторские права на которые принадлежат ФГБОУ ВО ПГУПС, могут быть перепечатаны при наличии письменного разрешения ФГБОУ ВО ПГУПС. Требуется предварительное согласие на перепечатку со стороны издателя.

Содержание

ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

И. С. Игошев, А. Ф. Колос	Водоудерживающая способность засоренного гранитного щебня	7
Л. В. Мартыненко, Д. П. Кононов	Применение программного комплекса Femar при комплексной оценке влияния неисправностей гидравлического гасителя колебаний на раму пассажирской тележки КВЗ-ЦНИИ	21
А. В. Агунов, А. В. Щербань, Д. Д. Архипов	Компьютерное моделирование работы защит фидеров контактной сети, применяемых на городском наземном электрическом транспорте	29
Е. А. Кайкина, А. В. Новичихин	Совершенствование функционирования транспортно-логистического центра: концепция и система управления	37
М. В. Шевлюгин, М. Р. Ради	Оценка целесообразности создания собственной генерации на основе укрупненных расчетов газотурбинных установок	47
А. В. Агунов, С. К. Тураев, Р. А. Щербаков	Исследование повреждений кабельных линий постоянного тока в процессе эксплуатации на городском наземном электрическом транспорте	61
Е. Г. Рейн, В. С. Шварцфельд	Проектирование высокоскоростных железнодорожных магистралей в России на базе международного стандарта колеи 1435 мм	76
Н. К. Маслов, Т. Ю. Вальцева, А. А. Сайдалиев	Лабораторные испытания виброизоляционных свойств упругих подбалластных материалов	91
Д. Н. Сомов, А. В. Петряев, И. Л. Парахненко, Н. И. Тенирядко	Сравнительный анализ модуля упругости балластной призмы при использовании технологий объемного уплотнения и традиционных методов выправки пути в условиях среднего ремонта железнодорожного полотна	107
А. В. Святогорова, И. В. Колос, Д. Р. Кузнецова, Т. Ю. Вальцева	Расчет осадки оттаивающих многолетнемерзлых грунтов земляного полотна при действии динамической нагрузки	124
Д. Н. Сомов, А. В. Петряев, И. Л. Парахненко, Н. И. Тенирядко	Влияние технологий стабилизации на деформационные характеристики балластной призмы железнодорожного пути	135

В. А. Анисимов, Р. Д. Пренинг, Н. Ю. Ильин, Г. А. Стрехнин	Формирование множества вариантов допустимых проектных решений при трассировании железной дороги в условиях пересеченного рельефа местности	149
---	--	-----

ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

В. С. Меркушева, Н. М. Панченко	Использование сценарного подхода при формировании комплектов строительной техники	159
Н. М. Панченко, Д. А. Басовский	Влияние надежности элементов строительного процесса на сроки строительства	167
А. В. Святогорова, Д. В. Рубцов, Е. И. Вельгун, Д. Л. Соколов	Лабораторные испытания оттаивающих многолетнемерзлых грунтов земляного полотна для определения статического и динамического модулей деформации	176
Д. В. Кодин, С. В. Шкурников	Кавказская перевальная железная дорога — путь к объединению народов	186
Л. М. Чеченова, В. С. Марютина	Профессиональные риски Санкт-Петербургского ИВЦ: экономическая сущность и минимизация их воздействия	194

Contents

PROBLEMATIC OF TRANSPORT SYSTEM

I. S. Igoshev, A. F. Kolos	Water-Holding Capacity of Clogged Granite Crushed Stone	18
L. V. Martynenko, D. P. Kononov	A Comprehensive Assessment of the Impact of the Hydraulic Vibration Damper Malfunctions on the KVZ-TsNII Passenger Bogie Frame Using the Femap Software Package	27
A. V. Agunov, A. V. Shcherban, D. D. Arkhipov	Computer Simulation of Feeder Protection Systems in Overhead Contact Network for Urban Electric Transport	35
E. A. Kaikina, A. V. Novitchihin	Improved Functioning of the Transport and Logistics Center: Concept and Management	45
M. V. Shevlyugin, M. R. Radi	Feasibility Assessment of Establishing Local Power Generation Based on Consolidated Calculations of Gas Turbine Installations	58
A. V. Agunov, S. K. Turaev, R. A. Shcherbakov	Assessment of DC Cable Line Damage During Urban Electric Transport Operation	73
E. G. Rein, V. S. Shvartcfeld	Design of High-Speed Railway Lines in Russia Based on the International Standard Gauge of 1435 mm	86
N. K. Maslov, T. Yu. Valtseva, A. A. Saidaliev	Laboratory Tests to Investigate the Vibration Isolation Properties of Elastic Under-Ballast Materials	105
D. N. Somov, A. V. Petriaev, I. L. Parakhnenko, N. I. Teniryadko	A Comparative Analysis of the Elastic Modulus of the Ballast Prism When Using Volumetric Compaction Technologies and Traditional Methods of Track Straightening in Medium-Scale Railway Track Repair Conditions	122
A. V. Svyatogorova, I. V. Kolos, D. R. Kuznetsova, T. Yu. Valtseva	Calculation of Permafrost Soil Thaw Settlement under Dynamic Load	133

D. N. Somov, A. V. Petriaev, I. L. Parakhnenko, N. I. Teniryadko	Influence of Stabilization Technologies on Deformation Parameters of a Railway Track Ballast Prism	146
V. A. Anisimov, R. D. Prening, N. Yu. Ilyin, G. A. Strehnin	Generating a Variety of Acceptable Design Solutions for Railway Alignment in Rough Terrain Conditions	156

GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH

V. S. Merkusheva, N. M. Panchenko	A Scenario Approach to Construction Equipment Selection	165
N. M. Panchenko, D. A. Basovskiy	The Influence of the Reliability of the Construction Process Components on the Construction Time	174
A. V. Svyatogorova, D. V. Rubtsov, E. I. Velgun, D. L. Sokolov	Laboratory Testing of Thawing Permafrost Subgrade Soils to Determine Static and Dynamic Deformation Modulus	184
D. V. Kodin, S. V. Shkurnikov	The Caucasian Mountain Railway: a Route to Uniting People	192
L. M. Chechenova, V. S. Maryutina	Professional Risks Associated with St. Petersburg ICC: their Economic Nature and Ways to Minimize their Impact	206

УДК 625.141.1

Водоудерживающая способность засоренного гранитного щебня

И. С. Игошев, А. Ф. Колос

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Игошев И. С., Колос А. Ф. Водоудерживающая способность засоренного гранитного щебня // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 3. — С. 7–20. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-7-20

Аннотация

Цель: Исследование водоудерживающей способности гранитного щебеночного балласта в зависимости от степени засорения фракцией 5–25 мм. **Методы:** Исследование проводилось в специальном боксе для определения водоудерживающих свойств и степени водонасыщения гранитного щебня, который используется в качестве основного материала в конструкции железнодорожного пути. Лабораторные испытания проводились с различным процентным содержанием засорителя фракций 5–25 мм (10 %, 20, 30, 40 % по массе заполнителя) в зерновом составе щебня. **Результаты:** Результаты испытания свидетельствуют о незначительном влиянии засорения щебня фракциями 5–25 мм на его водоудерживающую способность и степень водонасыщения. При наличии до 40 % по массе засорителя фракции 5–25 мм в зерновом составе щебня его влажность увеличилась не более чем на 0,4 %, а степень водонасыщения не превысила 0,04 д. е. в условиях эксплуатации железнодорожного пути. **Практическая значимость:** Засорение щебня, применяемого для балластного слоя железнодорожного пути, фракцией 5–25 мм до 40 % по массе приводит к незначительному увеличению водоудерживающей способности и степени водонасыщения, что не оказывает существенного влияния на снижение прочностных и деформационных характеристик щебня.

Ключевые слова: Железнодорожный путь, гранитный щебень, балластная призма, засорение балластного слоя, водоудерживающие свойства, степень водонасыщения.

Введение

В условиях перспективной эксплуатации железнодорожной линии с повышением осевых нагрузок и скорости движения поездов важнейшей задачей является обеспечение стабильности геометрии рельсовой колеи, в том числе за счет повышения стабильности и надежности работы балластного слоя [1]. Балластный слой как один из ключевых элементов пути должен обладать необходимыми физико-механическими свойствами для сохранения его эксплуатационных характеристик на протяжении всего жизненного цикла [2].

Как известно [3], изменение свойств щебеночного балласта железнодорожного пути называется «износом (деградацией) щебеночного балласта» и связывается с процессом его засорения и загрязнения, а также с ухудшением его физико-механических свойств в процессе эксплуатации.

Согласно [4], под засорением балластного слоя понимается появление в его зерновом составе частиц размером 0,1–25 мм — для щебня II категории по ГОСТ 7392—2014 [5].

Под загрязнением балластного слоя, в соответствии с [4], понимается изменение гранулометрического состава, выражающееся в увеличении содержания фракции менее 0,1 мм (пылеватых и глинистых частиц).

Засорение и загрязнение обусловлены как внутренними факторами (механическое разрушение зерен балласта под воздействием динамических нагрузок), так и внешними источниками загрязнения (сыпучие грузы, песок из песочниц локомотивов и др.) [3].

С наработкой тоннажа железнодорожный балласт подвергается загрязнению, засорению, увлажнению, что приводит к снижению прочностных и деформационных свойств щебня и, следовательно, к понижению несущей способности балластного слоя и интенсивному накоплению остаточных деформаций железнодорожного пути.

В статье [6] отмечается, что чистый и засоренный щебень в сухом состоянии практически не изменяет своих прочностных и деформационных свойств, наоборот, в насыщенном водой состоянии чистый щебень снижает свои свойства примерно на 15 %, а засоренный — на 20 %.

Согласно исследованиям [7], при динамической нагрузке на балласт частицы щебня разрушаются, образуя засорение фракцией менее 9,5 мм, следовательно, влага может задерживаться в балластном слое, что приведет к изменениям в характеристиках щебня. В ходе исследования разрушенного балласта с засорителями фракции менее 9,5 мм установлено, что в сухом состоянии (до 12 % влажности) свойства щебня остаются неизменными. При увеличении влажности до 3 % наблюдается снижение прочности материала приблизительно на 50 %.

Автор [8] провел исследование прочностных характеристик гранитного щебня при содержании засорения 0,1–5 мм до 12–15 % по массе. Установлено, что в сухом состоянии данные фракции незначительно влияют на прочностные свойства щебня. При этом существенно снижаются фильтрационные свойства, следовательно, вода задерживается в балласте, что приводит к резкому ухудшению прочностных характеристик материала.

Согласно [9], содержание частиц менее 4,75 мм (≈ 5 мм) в зерновом составе путевого щебня с ростом влажности приводит к изменению его первоначальных физико-механических характеристик, что способствует более интенсивному накоплению остаточных деформаций. Согласно данным автора, при содержании влаги более 3 % в засоренном балласте под воздействием циклических нагрузок происходит быстрое накопление остаточных деформаций в щебеночном балласте.

Также по результатам исследования А. Ф. Колоса [8] можно сказать, что как в сухом, так и во влажном состоянии угольная пыль приводит к понижению угла

внутреннего трения. В то же время удельное зацепление сухого балласта с увеличением доли угольной пыли в составе загрязнителя увеличивается, но при увлажнении наблюдается его снижение. Согласно [10], при увеличении загрязнения угольной пылью (до 25 % по массе) щебня в сухом состоянии прочностные характеристики ухудшаются примерно на 22 %, а при увеличении влажности до 35 % прочностные свойства ухудшаются на 40 %.

Загрязнение и засорение балластной призмы с ростом влажности приводит к уменьшению трения в щебне, уменьшению угла распространения давления, повышению давления на основную площадку земляного полотна [11].

Любое загрязнение и засорение балласта может оказывать как положительные, так и отрицательные воздействия на балласт. Значительное увеличение содержания загрязнения и засорения в балластном слое приводит к снижению дренажных свойств, что, в свою очередь, приводит к увеличению влажности в щебне, повышается степень водонасыщения, в результате чего снижается несущая способность балластной призмы [12].

Обобщая изученную литературу, можно утверждать, что влажность щебня является определяющим фактором и оказывает непосредственное влияние на прочностные и деформационные свойства щебня и, следовательно, на прочность и деформируемость балластного слоя. Однако остается неизученным вопрос изменения водоудерживающей способности и, соответственно, степени водонасыщения щебня при его засорении и загрязнении при фактической эксплуатации железнодорожного пути. Следовательно, не представляется возможным обеспечить и прогноз изменения прочностных и деформационных свойств щебня в процессе эксплуатации при наработке тоннажа и, соответственно, прочность и деформируемость балластной призмы.

Данное исследование посвящено изучению влияния засорения гранитного щебня II категории по ГОСТ 7392—2014 фракциями 5–25 мм, являющегося продуктом собственного дробления, на его водоудерживающую способность.

Материалы для исследования

В качестве основного материала для исследования принят гранитный щебень, так как данный материал имеет широкое применение в качестве балластного материала при строительстве железнодорожных путей.

Для проведения исследований водоудерживающей способности гранитного щебеночного балласта использовались специально подготовленные пробы щебня (рис. 1), которые соответствовали требованиям, предъявляемым к щебню II категории по ГОСТ 7392—2014 [5]. Для исследований использовалась фракция щебня с номинальным размером зерен от 25 до 60 мм с насыпной плотностью $\rho = 1370 \text{ кг/м}^3$. Фактический гранулометрический состав представлен на рис. 2.



Рис. 1. Щебень II категории, гранитный по ГОСТ 7392—2014 [5].
Автор: И. С. Игошев

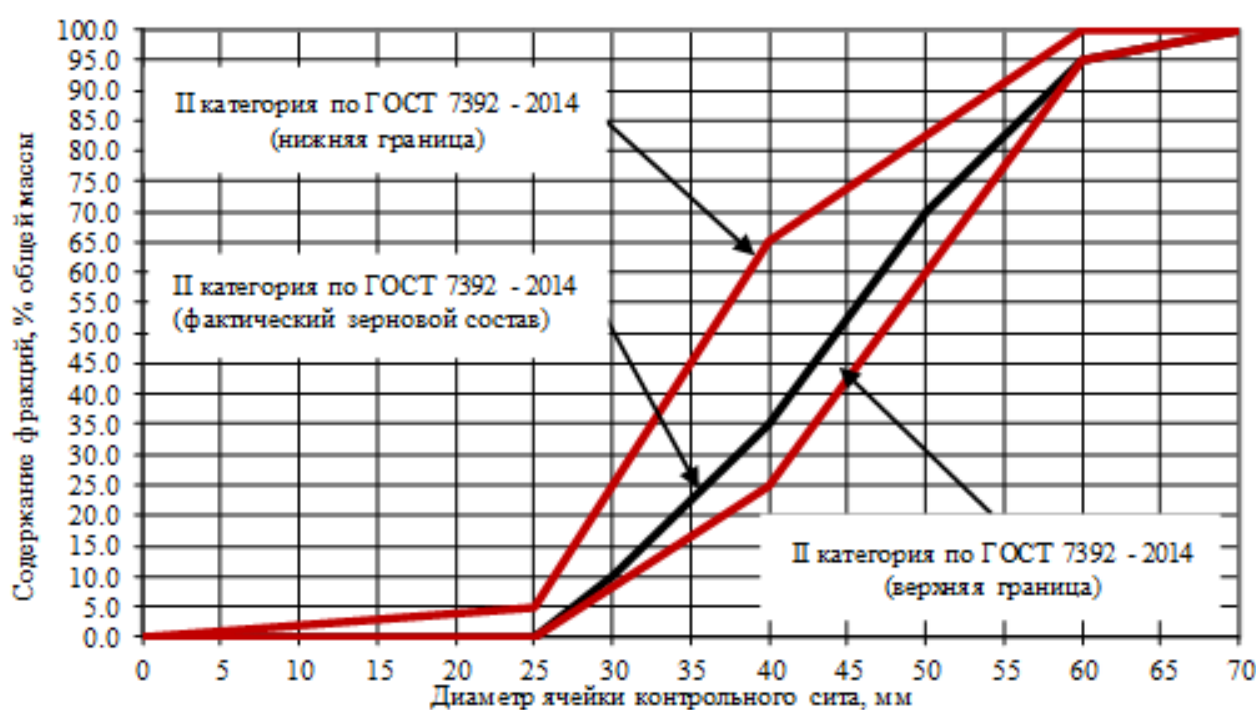


Рис. 2. Гранулометрический состав гранитного щебня II категории по ГОСТ 7392—2014 [5]. Автор: И. С. Игошев

Применительно к щебню II категории по ГОСТ 7392—2014 [5] критерием его загрязненности и засоренности является наличие во фракционном составе зерен менее 25 мм по массе, поэтому в качестве загрязняющего материала использовалась фракция щебня с номинальным размером зерен от 5 до 25 мм с насыпной плотностью $\rho = 1378 \text{ кг/м}^3$ (рис. 3, 4). Данная фракция щебня была выбрана для

имитации дробления щебеночного балласта под динамической нагрузкой и при работе рабочих органов балластоуплотнительных машин.

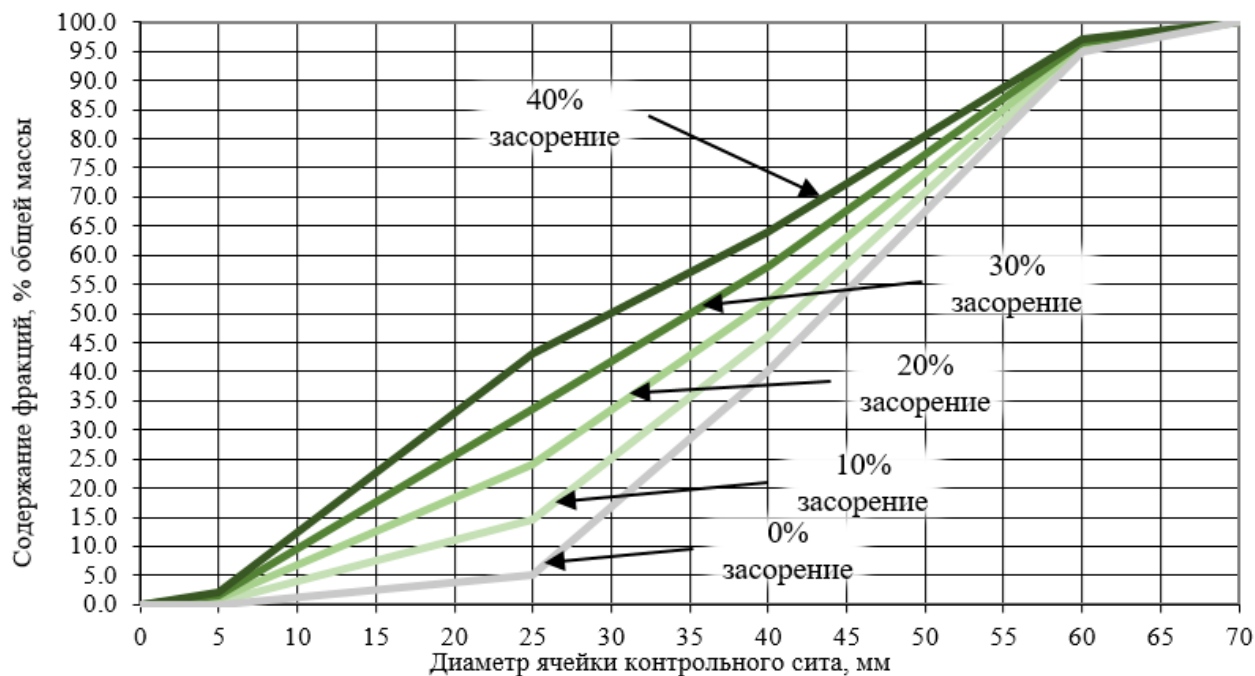


Рис. 3. Зерновой состав гранитного щебня, используемого в испытаниях, с различным уровнем засорения (0 %, 10, 20, 30, 40 % по массе) фракциями 5–25 мм. Автор: И. С. Игошев



Рис. 4. Щебень гранитный фракции 5–25 мм. Автор: И. С. Игошев

Для создания проб засоренного щебня основной материал (25–60 мм) смешивался с засоряющим материалом (5–25 мм) в следующих пропорциях: 10 %, 20, 30 и 40 % по массе. Выбранные концентрации засоряющего материала отражают типичные уровни засорения балластного слоя в процессе эксплуатации.

Смешивание проводилось механическим способом в течение 10 минут для обеспечения однородности состава. Подготовленные пробы хранились в герметичных контейнерах для предотвращения изменения их влажности и состава.

Методы испытаний, применяемое оборудование

Исследование водоудерживающей способности засоренного гранитного щебня проводилось в специальном боксе (рис. 5).



Рис. 5. Бокс для проведения испытания. Автор: И.С. Игошев

Бокс выполнен из пластика и имеет размеры $600 \times 400 \times 400$ мм. Общий объем бокса составляет $0,096 \text{ м}^3$, а вес — 3,7 кг.

В дно бокса врезан соединитель $3/4$ дюйма (20 мм), который предназначен для перекрытия потока воды и для обеспечения оттока воды из бокса, а также установлена специальная решетка, которая препятствует попаданию мелких частиц щебня 5–25 мм в соединитель (рис. 6).



Рис. 6. Бокс с соединителем для перекрытия воды и с оцинкованной решеткой внутри. Автор: И.С. Игошев

Бокс во время проведения испытаний устанавливался горизонтально на поверхности для обеспечения оттока воды. Вес бокса с оцинкованной решеткой и соединителем для перекрытия воды составляет 7,0 кг.

В бокс помещался образец высотой 30 см, а объем образца в боксе составлял 0,055 м³.

Общий подход к проведению испытания сводился к следующему.

1. Формирование образцов гранитного щебеночного балластного слоя II категории фракции 25–60 мм с имитацией засорения щебнем фракции 5–25 мм в процентном отношении 0, 10, 20, 30, 40 % по массе.

2. Каждый образец перед испытанием помещался в сушильный шкаф и высушивался в соответствии с ГОСТ 7392—2014 [5].

3. Образец помещается в бокс высотой 30 см и уплотняется с помощью ручного уплотнителя грунта с грузом (рис. 7).



Рис. 7. Ручной уплотнитель грунта с грузом.

Автор: И. С. Игошев

4. После осадки щебня в ящик досыпался дополнительный объем, после чего вновь производилось уплотнение. Таким образом добивались полной высоты образца в 30 см при плотности сухого щебня от 1590 до 1660 кг/м³.

5. После укладки образца в бокс его взвешивали вместе с образцом на весах и определяли массу образца, загруженного в бокс. Одновременно вычислялся и объем уплотненного щебня, что позволяло определить его плотность в сухом состоянии.

6. Для насыщения образца постепенно добавлялась вода, уровень которой превышал верхнюю границу образца на 20 мм. В таком состоянии образец выдерживали сутки. По истечении суток производилось открытие крана, и вода полностью сливалась из бокса.

7. Образец после увлажнения вместе с боксом вновь взвешивали. По разнице масс образца до и после водонасыщения определяли массу воды, оставшейся в образце, что позволило определить влажность щебня, которая характеризует его водоудерживающую способность.

8. После получения всех данных образец полностью разбирали, бокс мыли.

Обработка результатов испытаний

Обработка результатов проводилась в соответствии с ГОСТ 33057—2014 [13] и ГОСТ 25100—2020 [14].

В процессе исследования водоудерживающей способности щебня при засорении фракцией 5–25 мм получены необходимые данные, которые представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Данные, полученные в процессе испытаний

Характеристика пробы	Гранитный щебень II категории по ГОСТ 7392—2014 (фракция 25–60 мм) при засорении фракцией 5–25 мм в % по массе				
	Чистый (0 %)	10 %	20 %	30 %	40 %
m_n насыпного грунта, кг	75,35	75,4	75,44	75,48	75,53
Насыпная плотность щебня ρ , кг/м ³	1363	1364	1364	1365	1366
h , высота образца в боксе, см	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
m_1 сухого грунта с уплотнением в боксе, кг	88,7	87,7	87,84	89,7	91,4
Плотность пробы ρ_d , кг/м ³	1604	1586	1589	1622	1653
Коэффициент относительного уплотнения, д. е.	1,18	1,16	1,16	1,19	1,21
Пористость щебня n , д. е.	0,40	0,39	0,39	0,38	0,37
Коэффициент пористости e , д. е.	0,64	0,65	0,65	0,62	0,59
m насыщенного водой образца, кг	89,16	88,24	88,40	90,38	92,20
Влажность, после выдерживания образца в воде W , %	0,52	0,62	0,64	0,76	0,88
Коэффициент водонасыщения Sr , д. е.	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04

Результаты испытаний

Результаты выполненных исследований позволили определить водоудерживающую способность гранитного щебеночного балласта и степень водонасыщения. Результаты представлены в графической форме (рис. 8, 9).

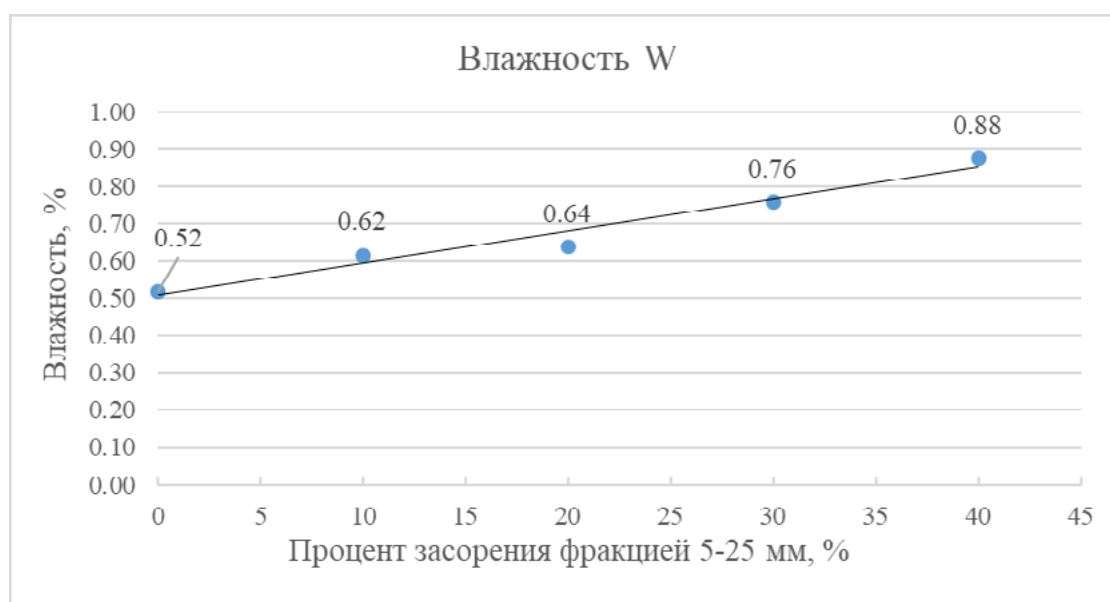


Рис. 8. Влажность (водоудерживающая способность) гранитного щебня при

засорении фракцией 5–25 мм после выдерживания
образца в воде. Автор: И. С. Игошев

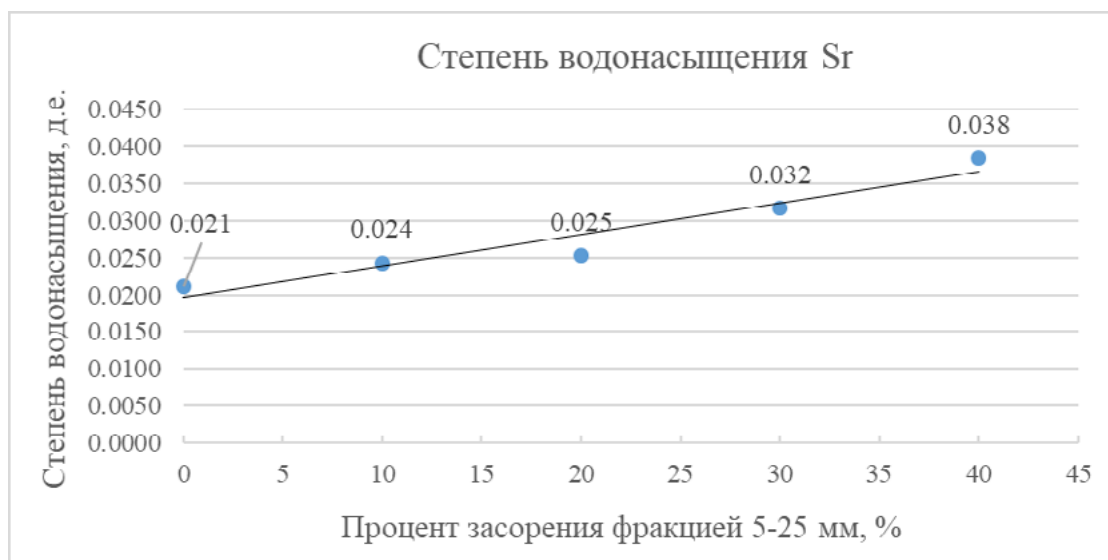


Рис. 9. Степень водонасыщения гранитного щебня
при засорении фракцией 5–25 мм после выдерживания образца в воде

Экспериментально установлено, что влажность гранитного щебня возрастает с увеличением степени его засорения по линейной зависимости, однако анализ полученных данных указывает на незначительный рост влажности, которая при засорении щебня до 40 % по массе не превысила 1 %.

Аналогичный вывод следует и в отношении степени водонасыщения щебня — с увеличением степени засорения гранитного щебня наблюдается закономерное повышение его водонасыщения, и при 40 % засорении степень водонасыщения не превысила 0,04 д. ед. Однако, несмотря на значительное засорение, в соответствии ГОСТ 25100—2020 [14] такой грунт классифицируется как маловлажный.

Таким образом, в результате засорения щебня фракцией 5–25 мм наблюдается незначительное повышение его водоудерживающей способности и степени водонасыщения, что не скажется на существенном снижении его прочностных и деформационных свойств.

Заключение

В результате проведенного исследования изучен характер влияния засорителей фракции 5–25 мм на водоудерживающую способность гранитного щебня II категории по ГОСТ 7392—2014. Анализ полученных данных позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Доказано, что увеличение содержания фракции 5–25 мм в зерновом составе гранитного щебня приводит к незначительному увеличению его

водоудерживающей способности щебня. При засорении образца на 40 % его влажность увеличилась лишь на 0,36 % относительно чистого образца.

2. Также доказано, что степень водонасыщения щебня при засорении 40 % по массе фракцией 5–25 мм не превышает 0,04 д. е., и щебень по ГОСТ 25100—2020 [14] классифицируется как маловлажный.

3. Указанные изменения водоудерживающей способности гранитного щебня, засоренного фракцией 5–25 мм до 40 % по массе, не приведут к значимому снижению его прочностных и деформационных характеристик, что доказано результатами исследований прошлых лет

Перспективы дальнейших исследований связаны с изучением водоудерживающей способности гранитного щебня при его засорении фракциями 0,1–5 мм, а также при его загрязнении песком и угольной пылью с фракцией менее 0,5 мм.

Список источников

1. О Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года: Распоряжение Правительства РФ от 17.06.2008 № 877-р // КонсультантПлюс: справочная правовая система. — URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_77643/ (дата обращения: 03.02.2025).
2. СП 238.1326000.2015. Свод правил. Железнодорожный путь: утвержден и введен в действие приказом Министерства транспорта Российской Федерации 06.07.2015 № 209. — М.: МГУПС (МИИТ), 2015. — 71 с.
3. Колос А. Ф. Засорение и загрязнение щебеночного балласта при эксплуатации железнодорожного пути / А. Ф. Колос // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 3. — С. 558–575.
4. Попов С. Н. Балластный слой железнодорожного пути / С. Н. Попов. — М.: Транспорт, 1965. — 183 с.
5. ГОСТ 7392—2014. Щебень из плотных горных пород для балластного слоя железнодорожного пути. Технические условия. — М.: Стандартиформ, 2015. — 32 с.
6. Ishikawa T. Influence of Water Content on Shear Behavior of Unsaturated Fouled Ballast / T. Ishikawa, S. Fuku, T. Nakamura, Y. Momoya et al. // Procedia Engineering. — 2016. — Vol. 143. — Pp. 268–275.
7. Qian Y. Moisture Effects on Degraded Ballast Shear Strength Behavior / Y. Qian, D. Mishra, E. Tutumluer, Y. Hashash et al. // JRC2016. — 2016. — P. V001T01A034.

8. Колос А. Ф. Несущая способность и деформируемость балластного слоя при эксплуатации железнодорожного пути: дис. ... д-ра техн. наук / А. Ф. Колос. — СПб., 2014. — 637 с.
9. Ebrahimi A. Deformational behavior of fouled railway ballast / A. Ebrahimi, J. Tinjum, T. Edil // *Canadian Geotechnical Journal*. — 2024. — Vol. 52. — Pp. 344–355.
10. Tutumluer E. Laboratory characterization of coal dust fouled ballast behavior / E. Tutumluer, P. Associate, P. Kent, W. Dombrow et al. // *Journal of the Transportation Research Board*. — 2008.
11. Косенко С. А. Причины отказов элементов железнодорожного пути на полигоне Западно-Сибирской железной дороги / С. А. Косенко, С. С. Акимов // *Вестник СГУПС*. — 2017. — № 3(42). — С. 26–34.
12. Лим В. Л. Механика поведения железнодорожного балласта: дис. ... д-ра техн. наук / В. Л. Лим. — Ноттингем: Ноттингемский ун-т, 2004. — На англ. яз.
13. ГОСТ 33057—2014. Дороги автомобильные общего пользования. Щебень и гравий из горных пород. Определение средней и истинной плотности, пористости и водопоглощения: межгосударственный стандарт. — М.: Стандартинформ, 2016. — 13 с.
14. ГОСТ 25100—2020. Грунты. Классификация: межгосударственный стандарт. — М.: Стандартинформ, 2020. — 41 с.

Дата поступления: 14.06.2025

Решение о публикации: 11.07.2025

Контактная информация:

ИГОШЕВ Иван Сергеевич — ассистент кафедры «Строительство дорог транспортного комплекса»

КОЛОС Алексей Федорович — заведующий кафедры «Строительство дорог транспортного комплекса»

Water-Holding Capacity of Clogged Granite Crushed Stone

I. S. Igoshev, A. F. Kolos

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Igoshev I. S., Kolos A. F. Water-Holding Capacity of Clogged Granite Crushed Stone. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 3, pp. 7–20. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-7-20

Summary

Purpose: To investigate the water-holding capacity of granite crushed stone ballast, with a stone fraction ranging from 5 to 25 millimetres. **Methods:** The experimental procedure was conducted within a designated container to ascertain the water-retention capabilities and degree of water saturation of granite crushed stone that is used as the primary material in the construction of railway tracks. Laboratory tests were conducted utilising varying percentages of clogging agent, ranging from 5 to 25 millimetres (10%, 20, 30, and 40% by mass of aggregate), within the grain composition of the crushed stone. **Results:** The test results demonstrate that clogging of crushed stone with particles ranging from 5 to 25 mm does not exert a significant influence on

its water-holding capacity and degree of water saturation. In the presence of up to 40% by weight of clogging agent with a size of 5–25 mm in the crushed stone grain, the moisture content increased by no more than 0.4%, and the degree of water saturation did not exceed 0.04 p.u. (percentage unit) in conditions of an active railway track. **Practical significance:** The clogging of crushed stone in a track ballast layer with 5–25 mm-size fractions and a mass percentage of up to 40% has negligible impact on the water-holding capacity and degree of water saturation. This phenomenon does not exert a substantial influence on the reduction of strength and deformation characteristics of the crushed stone.

Keywords: Railway track, granite crushed stone, ballast prism, clogging of crushed stone ballast layer, water retention properties, degree of water saturation.

References

1. Strategii razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda: Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 17.06.2008 № 877-r [On the Strategy for the Development of Railway Transport in the Russian Federation until 2030: Order of the Government of the Russian Federation of 17.06.2008 № 877-r]. *KonsultantPlus: spravochaya pravovaya sistema* [ConsultantPlus: legal reference system]. Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_77643/ (accessed: February 3, 2025). (In Russian)
2. SP 238.1326000.2015. *Svod pravil. Zheleznodorozhnyy put': utverzhden i vveden v deystvie prikazom Ministerstva transporta Rossiyskoy Federatsii 06.07.2015 № 209* [SP 238.1326000.2015. Code of Practice. Railway Track: approved and put into effect by order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated 06.07.2015 № 209]. Moscow: MGUPS (MIIT) Publ., 2015, 71 p. (In Russian)
3. Kolos A. F. Zasorenie i zagryaznenie shchebenochnogo ballasta pri ekspluatatsii zheleznodorozhnogo puti [Contamination and pollution of ballast during railway track operation]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. Saint Petersburg: PGUPS Publ., 2022, vol. 19, Iss. 3, pp. 558–575. (In Russian)
4. Popov S. N. *Ballastnyy sloy zheleznodorozhnogo puti* [Ballast layer of railway track]. Moscow: Transport Publ., 1965, 183 p. (In Russian)
5. GOST 7392—2014. *Shcheben' iz plotnykh gornykh porod dlya ballastnogo sloya zheleznodorozhnogo puti. Tekhnicheskie usloviya* [GOST 7392—2014. Crushed stone from dense rocks for railway track ballast. Technical specifications]. Moscow: Standartinform Publ., 2015, 32 p. (In Russian)
6. Ishikawa T., Fuku S., Nakamura T., Momoya Y. et al. Influence of Water Content on Shear Behavior of Unsaturated Fouled Ballast. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 143, pp. 268–275.
7. Qian Y., Mishra D., Tutumluer E., Hashash Y. et al. Moisture Effects on Degraded Ballast Shear Strength Behavior. *JRC2016*, 2016, pp. V001T01A034.
8. Kolos A. F. *Nesushchaya sposobnost' i deformiruemost' ballastnogo sloya pri ekspluatatsii zheleznodorozhnogo puti: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Bearing capacity and deformability of the ballast layer during railway track operation: Dr. tech. sci. diss.]. Saint Petersburg, 2014, 637 p. (In Russian)
9. Ebrahimi A., Tinjum J., Edil T. Deformational behavior of fouled railway ballast. *Canadian Geotechnical Journal*, 2024, vol. 52, pp. 344–355.

10. Tutumluer E., Associate P., Kent P., Dombrow W. et al. Laboratory characterization of coal dust fouled ballast behavior. *Journal of the Transportation Research Board*, 2008.
11. Kosenko S. A., Akimov S. S. Prichiny otkazov elementov zheleznodorozhnogo puti na poligone Zapadno-Sibirskoy zheleznoy dorogi [Causes of failures of railway track elements in the West Siberian railway]. *Vestnik SGUPS* [Bulletin of SGUPS]. Novosibirsk: SGUPS Publ., 2017, Iss. 3(42), pp. 26–34. (In Russian)
12. Lim V. L. *Mekhanika povedeniya zheleznodorozhnogo ballasta: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Mechanics of railway ballast behavior: Dr. tech. sci. diss.]. Nottingham: Nottingham University Publ., 2004.
13. *GOST 33057—2014. Dorogi avtomobil'nye obshchego pol'zovaniya. Shcheben'i graviy iz gornykh porod. Opredelenie sredney i istinnoy plotnosti, poristosti i vodopogloshcheniya* [GOST 33057—2014. Public roads. Crushed stone and gravel from rocks. Determination of average and true density, porosity and water absorption]: mezhgosudarstvennyy standart]. Moscow: Standartinform Publ., 2016, 13 p. (In Russian)
14. *GOST 25100—2020. Grunty. Klassifikatsiya: mezhgosudarstvennyy standart* [GOST 25100—2020. Soils. Classification: interstate standard]. Moscow: Standartinform Publ., 2020, 41 p. (In Russian)

Received: June 14, 2025

Accepted: July 11, 2025

Author's information:

Ivan S. IGOSHEV — Assistant, Department “Construction of roads of transport complex”

Aleksey F. KOLOS — Head of the Department “Construction of roads of transport complex”

УДК 629.463.32

Применение программного комплекса Femar при комплексной оценке влияния неисправностей гидравлического гасителя колебаний на раму пассажирской тележки КВЗ-ЦНИИ

Л. В. Мартыненко¹, Д. П. Кононов²

¹Иркутский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 664074, Иркутск, ул. Чернышевского, 15

²Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Мартыненко Л. В., Кононов Д. П. Применение программного комплекса Femar при комплексной оценке влияния неисправностей гидравлического гасителя колебаний на раму пассажирской тележки КВЗ-ЦНИИ // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 3. — С. 21–28. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-21-28

Аннотация

Цель: Определение влияния неисправностей гидравлического гасителя колебаний на раму пассажирской тележки КВЗ-ЦНИИ. **Методы:** Определено напряженно-деформированное состояние рамы тележки пассажирского вагона с помощью программного комплекса Femar под действием статических и динамических нагрузок. Определены причины возникновения неисправностей гидравлических гасителей колебаний, основной из которых является забивание каналов продуктами износа, возникающего в результате трения штока о внутреннюю поверхность цилиндра. **Результаты:** Проведенные расчеты, которые согласуются с результатами эксплуатации тележек пассажирских вагонов, показали наличие слабых мест в тележке. Это места крепления гидравлического гасителя колебаний к раме тележки. И если при исправном гасителе эквивалентные напряжения в этих местах не превышают допустимых значений, то при выходе из строя образуются трещины в раме тележки. Поэтому необходимо применять дополнительные конструктивные решения, повышающие надежность работы гасителя колебаний. **Практическая значимость:** Модернизация гидравлического гасителя колебаний тележки КВЗ-ЦНИИ типов I и II путем добавления в него неодимового магнита диаметром 20 мм позволит удалять из масла металлическую стружку, образующуюся из-за трения штока о стенки цилиндра, что повысит его надежность.

Ключевые слова: Безопасность движения, плавность хода, гидравлический гаситель колебаний, центральное люлочное подвешивание, гашение колебаний.

Введение

Отклонения в пути следования приводят к опасным последствиям, что для пассажирского движения недопустимо, так как обеспечение безопасности перевозки пассажиров является основной задачей ОАО «РЖД» [1].

Для оценки прочности вагона применяются физико-математическое моделирование и различные виды испытаний [2, 3]. Одним из инструментов, используемых для расчетов, является программный комплекс Femar. Он позволяет определить места в тележке пассажирского вагона, в которых действующие напряжения достигают максимальных значений и возможно образование трещин. Модель рамы пассажирской тележки, выполненная в программном комплексе Femar, представлена на рис. 1.

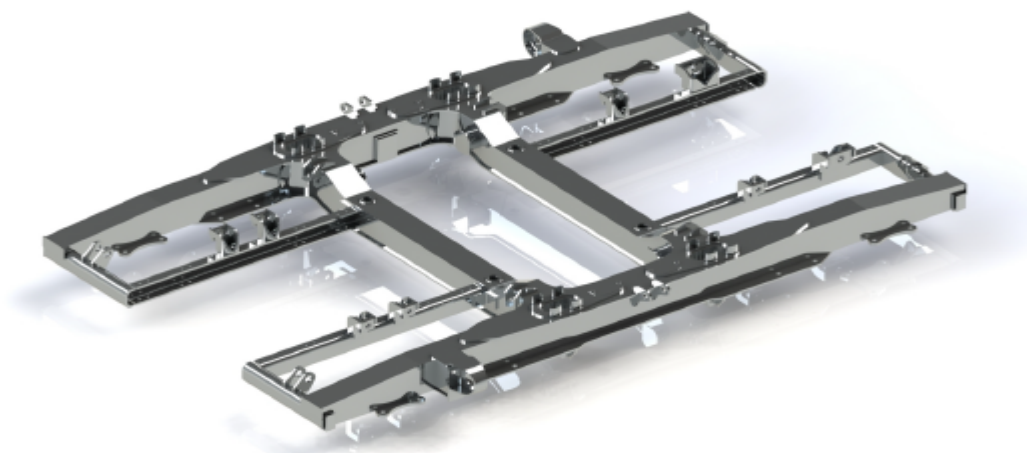


Рис. 1. 3D-модель рамы пассажирской тележки

Для определения напряжений, действующих в тележке, необходимо приложить нагрузки, возникающие в пути следования. Для этого используются Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог (рис. 2) [4].

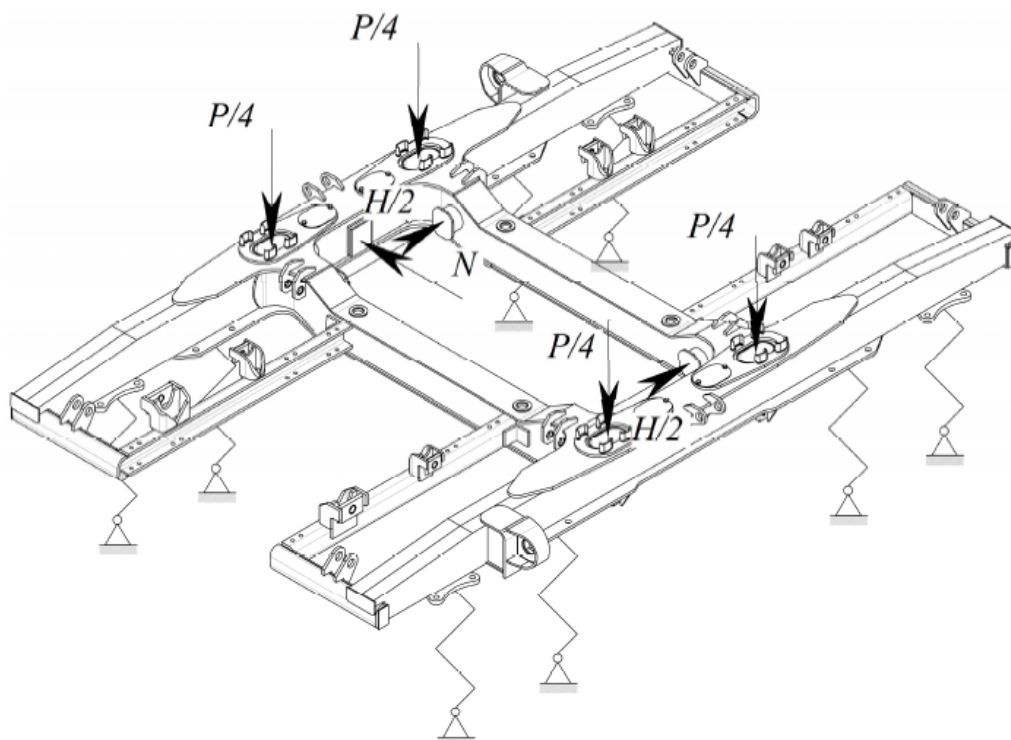


Рис. 2. Расчетная схема нагрузок на раму пассажирской тележки КВЗ-ЦНИИ

Тем не менее нагрузочная модель, приведенная в [4], не полностью учитывает динамическую составляющую, возникающую во время движения подвижного состава.

1. Исследование неисправностей гидравлического гасителя колебаний

Колебания кузова вызываются многими факторами [5], одним из которых является отклонение пути, создающее динамические всплески в процессе движения. Во время движения пассажирского вагона (со скоростью до 140 км/ч) неровности пути провоцируют значительные колебания кузова, характеризующиеся высокой амплитудой и частотой.

Для защиты от них используется центральное люлечное подвешивание. Оно должно обеспечивать максимальную защиту при движении подвижного состава. Комплект трехрядных пружин гасит вибрации, создавая плавное движение, но при этом вызывает колебания. Для их гашения применяется гидравлический гаситель колебаний. Данный узел имеет сложную конструкцию, и при нарушении его работы нагрузка, действующая на раму и передающаяся на центральное люлечное подвешивание, будет возвращаться на раму. Это приводит к большому динамическому воздействию на вагон и образованию трещины на раме в зоне крепления гидравлического гасителя колебаний (рис. 3) [6–8].

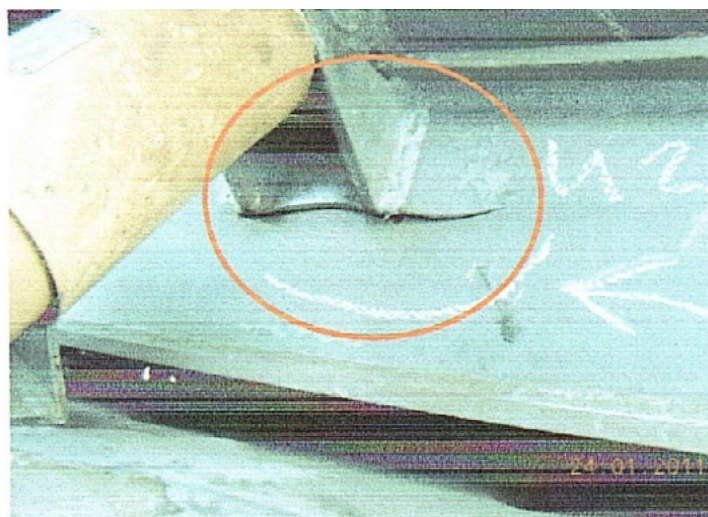


Рис. 3. Трещина в раме пассажирской тележки

Основным элементом гидравлического гасителя колебаний является шток, который создает давление внутри при движении масла, что обеспечивает гашение колебаний [9]. При работе штока (при движении вверх и вниз) контактирующие поверхности трутся друг о друга, в результате чего могут образовываться металлические включения, которые забивают проходные каналы для масла. Это приводит либо к уменьшению перетекания масла, либо к забиванию каналов, в результате чего данный узел перестает работать как гаситель. Образуется высокое внутреннее давление, которое приводит не только к образованию трещины, но и увеличивает риск динамического всплеска, негативно влияющего на остальные части рамы и узлы [10].

Процесс работы гидравлического гасителя колебаний зависит от конструкции, а также правильности распределения масла по всему объему. Когда происходит уменьшение отверстий для прохода масла, возрастает нагрузка на данный узел и увеличивается амплитуда колебаний вагонов (рис. 4).

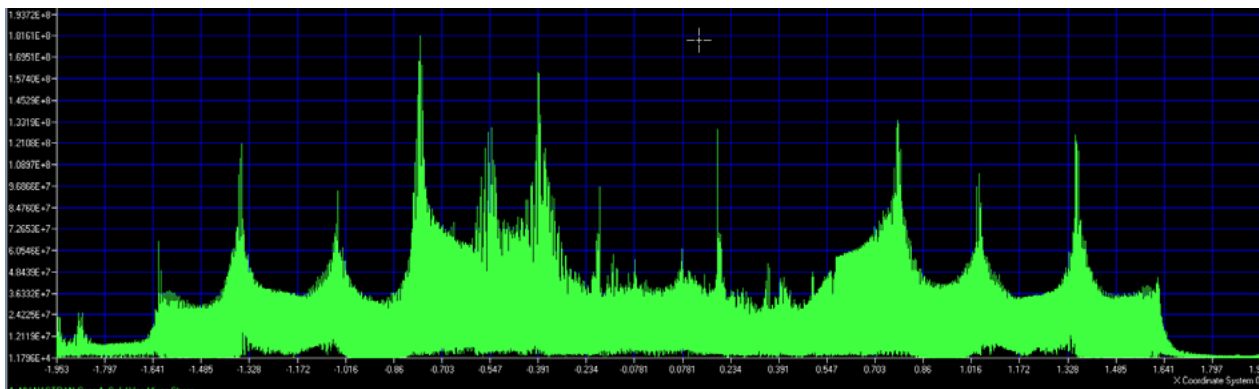


Рис. 4. Диаграмма распределения напряжений по боковой балке пассажирской тележки с учетом неправильной работы гидравлического гасителя колебаний

2. Работа гидравлического гасителя колебаний

Давление масла в подпоршневой полости цилиндра при ходе сжатия и растяжения повышенное. Поэтому масло вытесняется из цилиндра в резервуар через кольцевой зазор между штоком и его направляющей при обоих ходах (рис. 5). Увеличение этого зазора будет снижать сопротивление гасителя. Интенсивное падение сопротивления начинается при величине зазора 0,08 мм и более (рис. 6) [11].

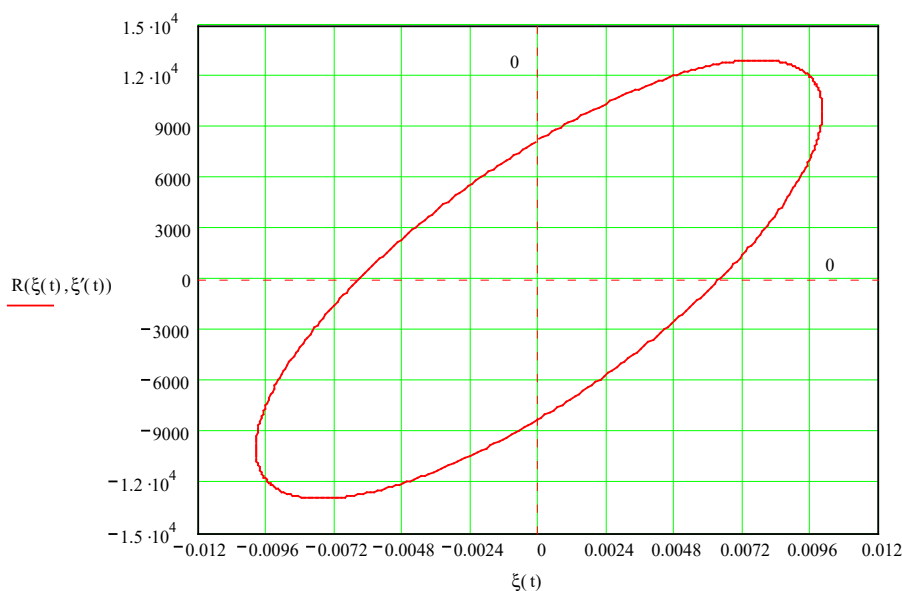


Рис. 5. Работа на сжатие гасителя колебаний:
 $\xi'(t)$ — скорость деформации связи во времени; $\xi(t)$ — изменение деформации во времени; R — реакция упруго-вязкой связи

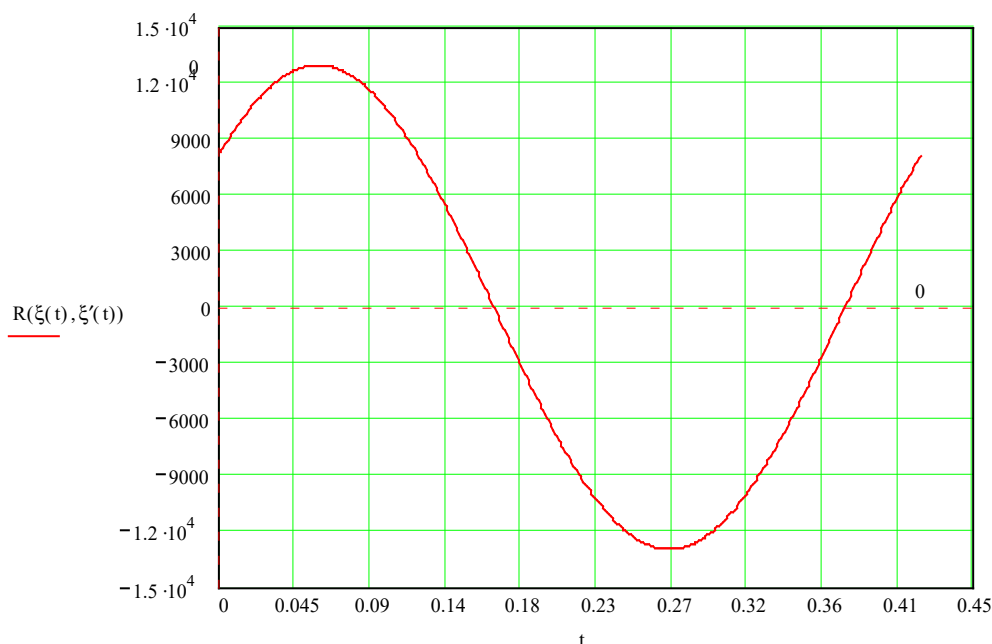


Рис. 6. Зависимость реакции упруго-вязкой связи от времени работы гидравлического гасителя колебаний

Кроме этого, при длительной эксплуатации масло, которое применяется в гидравлическом гасителе колебаний, имеет свойство работать как растворитель. В результате чего резиновые элементы могут разрушаться под его воздействием. Рабочая поверхность цилиндра со временем изнашивается, что приводит к выходу из строя поршневых колец. Кроме того, в процессе работы гасителя кольца теряют упругость и иногда лопаются [12].

Эти дефекты уменьшают компрессию между подпоршневой и надпоршневой полостями цилиндра. Во время хода растяжения масло дополнительно перетекает через зазор между стенками цилиндра и поршнем, что приводит к снижению силы сопротивления гасителя.

При неисправных гасителях колебаний кузов вагона более продолжительное время раскачивается на рессорном подвешивании. Гашение толчков и ударов происходит жестко, что создает условия для возникновения более серьезных неисправностей в узлах тележки. При эксплуатации гасителей колебаний происходит износ и повреждение деталей, включая сопряженные с ними каркасы сальников. Шток и внутренняя поверхность цилиндра получают местные выработки. По мере нарастания износа штока и его направляющей увеличивается кольцевой зазор между этими деталями.

Гидравлический гаситель колебаний тележки КВЗ-ЦНИИ (тип I, II) можно сделать более надежным за счет добавления неодимового магнита диаметром 20 мм. Это позволит удалять из масла металлическую стружку, образующуюся из-за трения штока о стенки цилиндра.

Заключение

Анализ расчетов, согласующихся с эксплуатационными данными тележек пассажирских вагонов, выявил слабое место конструкции — узлы крепления гидравлического гасителя колебаний к раме. И если при исправном гасителе эквивалентные напряжения в этих местах не превышают допустимых значений, то при выходе из строя образуются трещины в раме тележки. Поэтому необходимо применять дополнительные конструктивные решения, повышающие надежность работы гасителя колебаний.

Список источников

1. Стрекалина Р. П. Экономика и организация вагонного хозяйства / Р. П. Стрекалина. — М.: Маршрут, 2005. — 436 с.
2. Лукин В. В. Вагоны. Общий курс: учебник / В. В. Лукин, П. С. Анисимов, Ю. П. Федосеев. — М.: УМЦ ЖДТ, 2004. — 424 с.
3. Лукин В. В. Конструирование и расчет вагонов / В. В. Лукин, Л. А. Шадур, В. И. Хотуранов, А. А. Хохлов. — М.: УМК МПС России, 2000. — 732 с.
4. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). — М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. — 317 с.
5. Егоров В. П. Устройство и эксплуатация пассажирских вагонов (для проводников): учеб. пособие / В. П. Егоров. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: УМК МПС России, 1999. — 335 с.
6. Быков Б. В. Технология ремонта вагонов: учебник / Б. В. Быков, В. Е. Пигарев. — М.: ИПК «Желдориздат», 2001. — 559 с.
7. Пантюхин А. С. Справочник осмотрщика вагонов / А. С. Пантюхин. — М.: Желдориздат, 2008. — 209 с.
8. Устич П. А. Вагонное хозяйство / П. А. Устич, И. И. Хаба, В. А. Ивашов. — М.: Маршрут, 2003. — 560 с.
9. Челноков И. И. Гидравлические гасители колебаний пассажирских вагонов / И. И. Челноков. — М.: Транспорт, 1975. — 72 с.
10. Пригожаев С. С. Анализ влияния характеристик гидравлического гасителя колебаний на напряженно-деформированное состояние тележки пассажирского вагона / С. С. Пригожаев, А. А. Пыхалов, Н. О. Бурмакин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2022. — № 2(74). — С. 130–141. — DOI: 10.26735/1813-9108.2022.2(74).130-141.
11. Трескин С. В. Анализ применения гидравлических гасителей колебаний в конструкциях рессорного подвешивания подвижного состава железнодорожного транспорта / С. В. Трескин, Е. Ю. Дульский, В. А. Кручек, П. Ю. Иванов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2024. — Т. 21. — № 3. — С. 598–608. — DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-598-608.

12. Трескин С. В. Причины неисправностей гидравлических гасителей колебаний подвижного состава железнодорожного транспорта и возможные пути совершенствования их конструкции / С. В. Трескин, Е. Ю. Дульский, П. Ю. Иванов и др. // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. — 2025. — № 5. — С. 21–31. — DOI: 10.36535/0236-1914-2025-05-3.

Дата поступления: 09.06.2025

Решение о публикации: 11.07.2025

Контактная информация:

МАРТЫНЕНКО Любовь Викторовна — ст. преподаватель; liuba.martinenko@yandex.ru

КОНОНОВ Дмитрий Павлович — д-р техн. наук, проф.; d_kononov@mail.ru

A Comprehensive Assessment of the Impact of the Hydraulic Vibration Damper Malfunctions on the KVZ-TsNII Passenger Bogie Frame Using the Femap Software Package

L. V. Martynenko¹, D. P. Kononov²

¹Irkutsk State Transport University, 15, Chernyshevskogo str., Irkutsk, 664074, Russian Federation

²Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Martynenko L. V., Kononov D. P. A Comprehensive Assessment of the Impact of the Hydraulic Vibration Damper Malfunctions on the KVZ-TsNII Passenger Bogie Frame Using the Femap Software Package. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 3, pp. 21–28. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-21-28

Summary

Purpose: To determine the effect of malfunctions of the hydraulic vibration damper on the KVZ-TsNII passenger bogie frame. **Methods:** The stress-strain state of the passenger car bogie frame under the influence of static and dynamic loads has been determined by applying the Femap software package. The causes of malfunctions in hydraulic vibration dampers have been identified, with the primary cause being the accumulation of wear products in the channels, resulting from the friction of the rod against the inner surface of the cylinder. **Results:** The calculations have demonstrated a high degree of agreement with the operational data from the actual passenger car bogie operation, and have identified the weak points in the bogie. These are the points of the hydraulic vibration damper attachment to the bogie frame. In the event of the damper functioning correctly, the equivalent stresses in these locations do not exceed the permissible values. However, in the event of failure, cracks are formed in the bogie frame. It is imperative, therefore, to implement supplementary design solutions with the objective of enhancing the reliability of the operation of the vibration damper. **Practical significance:** The modification of the hydraulic vibration damper of the I and II KVZ-TsNII type bogie by the incorporation of a neodymium magnet with a diameter of 20 mm will facilitate the removal of metal shavings from the oil resulting from the friction of the rod against the cylinder walls, thereby enhancing its reliability.

Keywords: Safety of operation, smooth running, hydraulic vibration damper, central cradle suspension, vibration damping.

References

1. Strekalina R. P. *Ekonomika i organizatsiya vagonnogo khozyaistva* [Economics and organization of carriage facilities]. Moscow: Marshrut Publ., 2005, 436 p. (In Russian)
2. Lukin V. V., Anisimov P. S., Fedoseev Yu. P. *Vagoni. Obshchii kurs: uchebnik* [Carriages. General course: textbook]. Moscow: UMTs ZhDT Publ., 2004, 424 p. (In Russian)
3. Lukin V. V., Shadur L. A., Khoturanov V. I., Khokhlov A. A. *Konstruktsiya i raschet vagonov* [Design and calculation of carriages]. Moscow: UMKS MPS Rossii Publ., 2000, 732 p. (In Russian)
4. *Normy dlya rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznnykh dorog MPS koley 1520 mm (nesamokhodnykh)* [Standards for calculation and design of non-self-propelled carriages for 1520 mm gauge]. Moscow: GosNIIV-VNIIZHT Publ., 1996, 317 p. (In Russian)
5. Egorov V. P. *Ustroistvo i ekspluatatsiya passazhirskikh vagonov: ucheb. posobie, 2-e izd., pererab. i dop.* [Design and operation of passenger carriages (for conductors): textbook, 2nd ed., revised and enlarged]. Moscow: UMKS MPS Rossii Publ., 1999, 335 p. (In Russian)
6. Bykov B. V., Pigarev V. E. *Tekhnologiya remonta vagonov: uchebnik* [Carriage repair technology: textbook]. Moscow: IPK "Zheldorizdat" Publ., 2001, 559 p. (In Russian)
7. Pantyukhin A. S. *Spravochnik osmotschika vagonov* [Carriage inspector's handbook]. Moscow: Zheldorizdat Publ., 2008, 209 p. (In Russian)
8. Ustich P. A., Khaba I. I., Ivashov V. A. *Vagonnoe khozyaistvo* [Carriage facilities]. Moscow: Marshrut Publ., 2003. 560 p. (In Russian)
9. Chelnokov I. I. *Gidravlicheskie gasiteli kolebanii passazhirskikh vagonov* [Hydraulic dampers of passenger carriages]. Moscow: Transport Publ., 1975, 72 p. (In Russian)
10. Prigozhaev S. S., Pykhalov A. A., Burmakina N. O. Analiz vliyaniya kharakteristik gidravlicheskogo gasitelya kolebanii na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie telezhki passazhirskogo vagona [Analysis of the influence of hydraulic damper characteristics on the stress-strain state of a passenger carriage bogie]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling]. 2022, vol. 2(74), pp. 130–141. DOI: 10.26735/1813-9108.2022.2(74).130-141. (In Russian)
11. Treskin S. V., Dul'skiy E. Yu., Kruchek V. A., Ivanov P. Yu. Analiz primeneniya gidravlicheskikh gasitelei kolebanii v konstruktsiyakh ressnogo podveshivaniya podvizhnogo sostava zheleznodorozhnogo transporta [Analysis of the application of hydraulic vibration dampers in the designs of spring suspension of railway rolling stock]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya* [Proceedings of the Petersburg Transport University]. Saint Petersburg, 2024, vol. 21, Iss. 3, pp. 598–608. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-598-608. (In Russian)
12. Treskin S. V., Dul'skiy E. Yu., Ivanov P. Yu. et al. Prichiny neispravnostei gidravlicheskikh gasitelei kolebanii podvizhnogo sostava zheleznodorozhnogo transporta i vozmozhnye puti sovershenstvovaniya ikh konstruktsii [Causes of malfunctions of hydraulic vibration dampers of railway rolling stock and possible ways to improve their design]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyi informatsionnyi sbornik* [Transport: science, technology, management. Scientific information collection]. 2025, Iss. 5, pp. 21–31. DOI: 10.36535/0236-1914-2025-05-3. (In Russian)

Received: June 09, 2025

Accepted: July 11, 2025

Author's information:

Lyubov' V. MARTYNENKO — Senior Lecturer; liuba.martinenko@yandex.ru

Dmitry P KONONOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; d_kononov@mail.ru

УДК 621.316.925

Компьютерное моделирование работы защит фидеров контактной сети, применяемых на городском наземном электрическом транспорте

А. В. Агунов¹, А. В. Щербань², Д. Д. Архипов²

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

²СПб ГУП «Горэлектротранс», Российская Федерация, 196105, Санкт-Петербург, Сызранская ул., 15

Для цитирования: Агунов А. В., Щербань А. В., Архипов Д. Д. Компьютерное моделирование работы защит фидеров контактной сети, применяемых на городском наземном электрическом транспорте // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 3. — С. 29–36. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-29-36

Аннотация

Цель: Оценка эффективности существующих видов защиты контактной сети от токов перегрузки и коротких замыканий, а также выявление особенностей поведения защиты в различных аварийных ситуациях, включая процессы рекуперации энергии в системах городского электротранспорта на примере предприятия СПб ГУП «Горэлектротранс». **Методы:** Использованы теоретический анализ нормативных документов и инструкций, а также проведение численных экспериментов с применением программы MATLAB Simulink для моделирования типичных случаев отказов и аварийных состояний контактной сети, таких как короткие замыкания различного типа и рекуперация энергии при движении подвижного состава. **Результаты:** Получены количественные оценки токов и напряжений в контактной сети при различных аварийных сценариях, выявлена недостаточная чувствительность существующей защиты к маломощным коротким замыканиям и явлениям, связанным с обратной полярностью тока при процессах рекуперации. Установлено, что традиционные средства защиты недостаточно эффективны при небольших значениях аварийных токов и специфических особенностях транзита энергии в контактах с низким сопротивлением. **Практическая значимость:** Представленные результаты указывают на необходимость переосмысления подходов к проектированию и внедрению систем защиты контактных сетей с целью повышения их чувствительности к критически важным видам нарушений, таким как малые токи короткого замыкания и особые ситуации, возникающие при обратном направлении потоков энергии (рекуперация). Предложены рекомендации по совершенствованию организационно-технических мероприятий и внедрению автоматизированных систем мониторинга состояния контактной сети и оборудования, позволяющих минимизировать риски аварии и обеспечить стабильную эксплуатацию городского электротранспорта.

Ключевые слова: Городской электрический транспорт, защита контактной сети, короткое замыкание, рекуперация энергии, мониторинг.

В настоящее время в СПб ГУП «Горэлектротранс» защита контактной сети от токов перегрузки, в том числе от токов короткого замыкания (КЗ), имеет следующие виды [1, 2]:

1. Защита от перегрузки — срабатывает при достижении током значения в 2700 А, время срабатывания 0,08 секунды, далее происходит с выдержкой времени до 8 секунд срабатывание автоматического повторного включения, в случае повторного срабатывания защиты после автоматического повторного включения

оно блокируется, и линия находится отключенной до устранения причины возникновения тока перегрузки, после чего вручную (посредством энергодиспетчера) линия возвращается в работу.

2. Токо-временная защита контактной сети, которая реагирует на температуру нагрева проводов, уставки по этой защите получены эмпирическим путем [3].

Скрытое короткое замыкание на линии обычно трудно определить. Чаще всего это происходит при пробое изоляции пряжечного изолятора или изоляционного болта подвеса, при падении проволоки на провод и сваривании с ним, а также при скрытом коротком замыкании в силовой цепи какого-либо трамвая или троллейбуса, находящегося на данном участке питания.

Место скрытого короткого замыкания отыскивают в определенной последовательности. Начинают поиски с объезда участка, осмотра контактной сети и опроса линейных работников и постовых милиционеров обо всех замеченных ими случаях вспышек электрической дуги на сети. Дальнейшие поиски ведут при участии электродиспетчера.

Последовательно проверяют линию, поочередно отключая непассажи́рские участки, кабельные междупутные перемычки, питающие линии. Опускаются все токоприемники с контактного провода. Если при этом короткое замыкание исчезнет, то неисправный вагон (троллейбус) обнаружится при очередном пуске вагонов. Если все указанные выше меры не дают положительного результата, сеть делят на участки и поочередно выключают каждый участок, пока не найдут повреждения [4].

В депо на секционированной сети поиски скрытого короткого замыкания электродиспетчер начинает сразу же по получении сообщения и одновременно высылает на это место бригаду технической помощи.

Дежурный по депо по распоряжению электродиспетчера отключает разъединители питающей линии и секций. Затем включает с подстанции питающую линию, а при ее исправности поочередно в последовательности, указанной электродиспетчером, включает разъединители секции. При включении неисправной секции произойдет автоматическое отключение на подстанции. Отключив неисправную секцию, включают в работу остальные.

Поиски короткого замыкания на неисправной секции ведут бригады технической помощи в порядке, указанном для пассажирской линии [4].

Наличие повышенного напряжения в контактной сети и большие рекуперационные токи могут приводить к следующим опасным и аварийным ситуациям [5]:

1) выходу из строя предохранителей и систем электронного управления электрооборудованием подвижного состава (наблюдалось в течение опытной эксплуатации);

2) перегреву силового электрооборудования подвижного состава при гашении мощности рекуперации;

- 3) преждевременному износу контактов АВ на подстанциях;
- 4) преждевременному износу, выходу из строя и даже возгоранию элементов трамвайно-троллейбусных пересечений и секционных изоляторов вследствие образования дуги обратной полярности, гашение которой не предусмотрено их конструкцией;
- 5) временному обесточиванию контактной сети в случае срабатывания БАОД (не наблюдалось в течение опытной эксплуатации);
- 6) выходу из строя вентилях выпрямительных агрегатов (в случае неисправности ограничителей напряжения).

В рамках исследования в программном пакете Matlab Simulink была разработана компьютерная модель [6] (рис. 1) линии «трамвай — троллейбус» со следующими характеристиками и допущениями [1, 2]:

1. Протяженность линии принята равной средней длине питаемого участка в 1 км.
2. В качестве контактной подвески принята медная проволока сечением 85 мм².
3. Питание осуществляется посредством источника постоянного напряжения (цепи выпрямителя и внешнего электроснабжения не моделировались).
4. Принято, что подвижной состав, следующий друг за другом, не может приближаться друг к другу при подключенном питании ближе чем на 200 м.
5. Расчет осуществляется по мгновенным схемам моделируемых ситуаций.
6. Цепи заземления (обратных токов) не имеют потерь на «блуждающие» токи в линии трамвая.
7. Весь подвижной состав потребляет максимально допустимый рабочий ток при новом, неизношенном контактном проводе.

На разработанной компьютерной модели исследовались следующие случаи, возможные в ходе эксплуатации:

1. На трамвайно-троллейбусной линии идет движение с несколькими подвижными составами с минимально обусловленным расстоянием.
2. Короткое замыкание на землю (глухое) в линии «трамвай — троллейбус» при одном электроподвижном составе каждого вида в режиме потребления электроэнергии.
3. Короткое замыкание между контактной подвеской трамвая и троллейбуса при одном электроподвижном составе каждого вида в режиме потребления электроэнергии.
4. Рекуперация одного трамвая на линии.
5. Рекуперация одного трамвая на линии при возникновении короткого замыкания между контактной подвеской трамвая и троллейбуса.

На рис. 1 приведена модель подвижного состава.

В табл. 1 приведены результаты моделирования работы защиты контактной сети в заданных режимах.

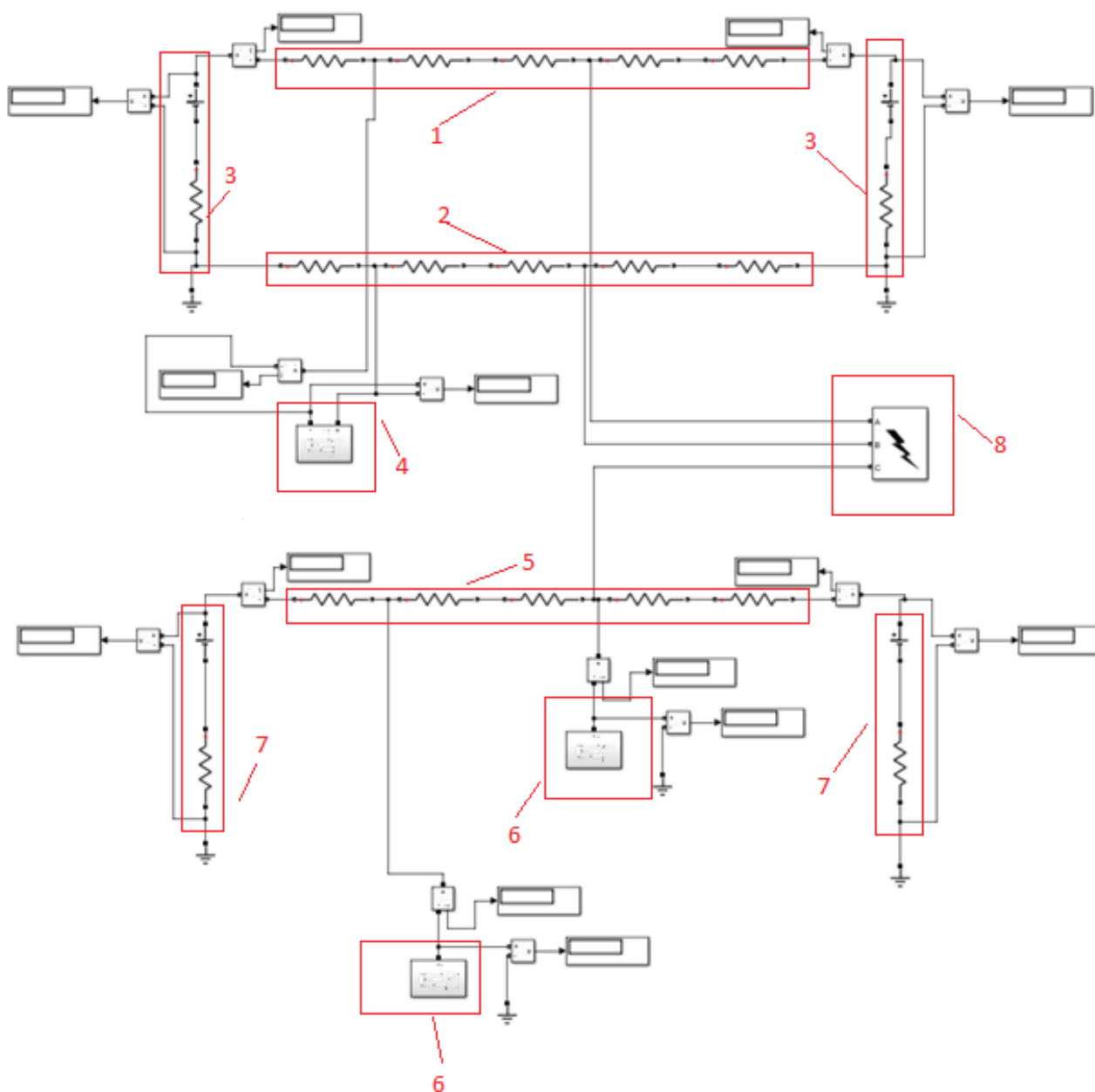


Рис. 1. Компьютерная модель линии «трамвай — троллейбус»
в программном пакете Matlab Simulink:

- 1 — положительный контактный провод троллейбуса, где каждый элемент имеет сопротивление, соответствующее 200-метровому участку принятого контактного провода; 2 — отрицательный контактный провод троллейбуса; 3 — питание контактной подвески троллейбуса номинальным напряжением 600 В; 4 — модель электроподвижного состава (троллейбус); 5 — контактный провод трамвая (контактный провод трамвая состоит из элементов, каждый из которых имеет сопротивление, равное сопротивлению 200-метрового участка принятого контактного провода); 6 — модель электроподвижного состава (трамвай); 7 — питание контактной подвески трамвая номинальным напряжением 600 В; 8 — управляемый короткозамыкатель

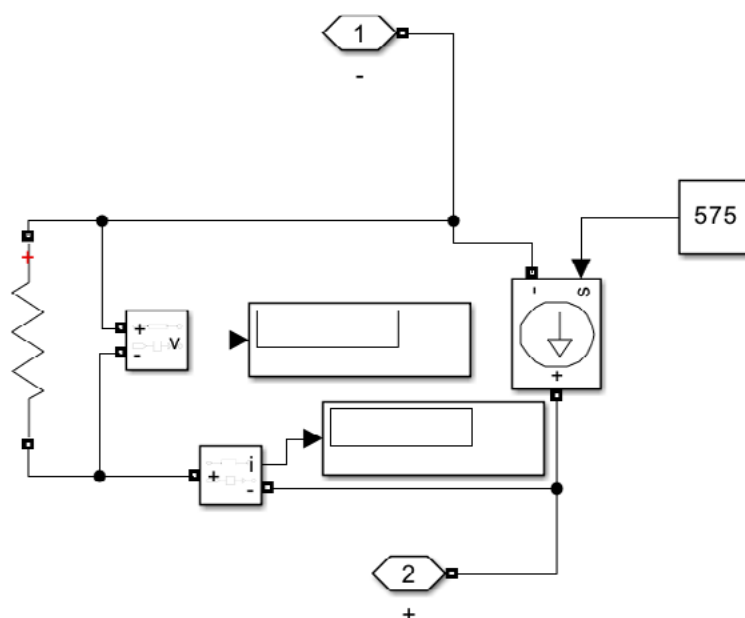


Рис. 2. Модель подвижного состава.

ТАБЛИЦА 1. Результаты моделирования работы защиты контактной сети в заданных режимах

№ п/п	Рассматриваемый режим	Величина тока, А	Величина напряжения, В
1.	Движение с нескольких подвижных составов с минимально обусловленным расстоянием	1750	460,3
2.	Короткое замыкание на землю (глухое) в линии «трамвай — троллейбус» при одном электроподвижном составе каждого вида в режиме потребления электроэнергии	6081	227,3
3.	Короткое замыкание между контактной подвеской трамвая и троллейбуса при одном электроподвижном составе каждого вида в режиме потребления электроэнергии	2516	176,3
4.	Рекуперация одного трамвая на линии	344	600,6
5.	Рекуперация одного трамвая на линии при возникновении короткого замыкания между контактной подвеской трамвая и троллейбуса	2324	412,5

По полученным результатам были сделаны следующие выводы:

1. При наличии 6 электроподвижных составов на каждой линии с расстоянием между ними 200 м и при потреблении максимального рабочего тока в контактной сети протекают токи величиной 1750 А. По уставкам токовой защиты такое значение допустимо в течение 22 секунд в летний период. Кроме того, на подвижном составе, находящемся в средней части питаемой зоны, наблюдается напряжение 460 В, что близко к минимально допустимому рабочему напряжению. Существующий вид защиты контактной сети является приемлемым.

2. При глухом коротком замыкании ток в контактной сети трамвая и троллейбуса может достигать 6 кА. Система защиты гарантированно обнаружит такое

превышение и произведет автоматическое отключение сети, что подтверждает ее эффективность при подобных аварийных ситуациях.

3. При замыкании контактных подвесок трамвая и троллейбуса друг на друга аварийный ток короткого замыкания достигает 2516 А. Система защиты обеспечивает отключение линии в течение 6 секунд в летний период. Эффективность такой защиты для данного режима подтверждается ее срабатыванием в установленные временные рамки.

4. При рекуперации трамвая в контактной сети протекает ток обратной полярности, значение которого не превышает рабочие параметры (350–550 А). Однако при возникновении замыкания на специальных частях система защиты не сможет его обнаружить. Кроме того, из-за обратной полярности тока дуга не будет погашена. Также видно повышение напряжения на подвижном составе и на подстанциях выше заданного, что в реальных условиях может приводить к перенапряжению, выходящему за максимально допустимое. Возникновение электрической дуги в режиме рекуперации представляет серьезную опасность, поскольку такая аварийная ситуация остается незаметной для существующей системы защиты. Это может привести к серьезным повреждениям элементов контактной сети, их разрушению и возникновению чрезвычайно опасных аварийных ситуаций.

5. В условиях рекуперативного режима при замыкании контактных подвесок трамвая и троллейбуса величина аварийного тока достигает значений, достаточных для срабатывания существующих систем защиты. Время срабатывания составляет 14 секунд [3].

6. При возникновении токов короткого замыкания через большое переходное сопротивление (электрическая дуга с сопротивлением 5–6 мОм) аварийные токи не регистрируются существующей системой защиты [7].

Таким образом, несмотря на эффективность существующей системы защиты при большинстве аварийных ситуаций, выявлены существенные ограничения в обнаружении малых токов короткого замыкания. В связи с этим требуется модернизация системы защиты контактной сети с учетом современных требований безопасности и технических возможностей.

Решение вышеуказанных задач возможно посредством проведения экспериментальных исследований работы контактной сети. Цель исследований — выявление характерных признаков, позволяющих достоверно определять малые токи короткого замыкания, включая случаи с обратной полярностью тока при рекуперации.

Внедрение систем непрерывного мониторинга аварийных процессов на тяговых подстанциях обеспечит комплексный контроль технического состояния инфраструктуры. Система позволит в режиме реального времени отслеживать и анализировать предаварийные и аварийные состояния всех ключевых элементов: контактной сети, фидерных линий, автоматических выключателей, шин, выпрямительных агрегатов и подвижного состава.

Список источников

1. Правила технической эксплуатации трамвая (ПТЭ трамвай) / Минтранс России. — М., 2016.
2. Правила технической эксплуатации троллейбуса (ПТЭ троллейбус) / Минтранс России. — М., 2016.
3. Инструкция по устройству и обслуживанию контактной сети трамвая и троллейбуса / Минтранс России. — М., 2005.
4. Афанасьев А. С. Контактные сети трамвая и троллейбуса: учебник для СПТУ / А. С. Афанасьев. — М.: Транспорт, 1988. — 264 с.
5. Кацай А. В. Преобразование энергии рекуперации в городском электротранспорте / А. В. Кацай, М. В. Шевлюгин // Вестник ПНИПУ. — 2022. — № 43. — С. 5–28.
6. Яблоков А. А. Компьютерное моделирование в электроэнергетике и электротехнике. Ч. 1. MATLAB / А. А. Яблоков, Е. Е. Готовкина. — Иваново, 2021. — 179 с.
7. Трофимов О. А. Исследование влияния повышения напряжения и большого количества рекуперационных токов на безопасность и надежность функционирования городской контактной сети / О. А. Трофимов, Н. В. Глушков // Вестник науки и техники. — 2022. — № 12. — С. 45–56.

Дата поступления: 24.06.2025

Решение о публикации: 20.07.2025

Контактная информация:

АГУНОВ Александр Викторович — д-р техн. наук, проф.; alexagunov@mail.ru

ЩЕРБАНЬ Александр Владимирович — начальник ОСП «Энергохозяйство»; en_gi@spbget.ru

АРХИПОВ Дмитрий Дмитриевич — заместитель начальника ПТО ОСП «Энергохозяйство»; digital5563@icloud.com

Computer Simulation of Feeder Protection Systems in Overhead Contact Network for Urban Electric Transport

A. V. Agunov¹, A. V. Shcherban², D. D. Arkhipov²

¹Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²SUE "Gorelektrotrans", 15, Syzranskaya str., Saint Petersburg, 196105, Russian Federation

For citation: Agunov A. V., Shcherban A. V., Arkhipov D. D. Computer Simulation of Feeder Protection Systems in Overhead Contact Network for Urban Electric Transport. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 3, pp. 29–36. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-29-36

Summary

Purpose: To evaluate the efficiency of the available protection measures against overload currents and short circuits, and to identify the specific behaviour of these protections in various emergency situations, including energy recovery processes in urban electric transportation systems using the practices of «Gorelektrotrans» State Unitary Enterprise (SUE) in St. Petersburg. **Methods:** A theoretical analysis of regulatory documents and instructions has been undertaken, along with numerical experiments using MATLAB Simulink software. The aim

of the experiments was to simulate typical failure cases and emergency states of the overhead contact network, such as different types of short-circuits and energy recovery during rolling stock movement. **Results:** The results provide quantitative estimates of the current and voltage values in the contact network under different failure scenarios. They reveal that the existing protective measures are insufficiently sensitive to low-power short-circuit events and reverse polarity current phenomena during energy recuperation. It has been established that traditional protective devices are ineffective in the event of small-scale fault currents and the unique features associated with energy transfer through low-resistance contacts. **Practical significance:** The practical significance of the research is to emphasise the need to reconsider the design and implementation of protective systems for contact networks. The aim is to enhance the sensitivity of these systems to critical failures, such as minor short-circuit currents, and to conditions arising from reversed energy flow (recuperation). A series of recommendations have been proposed to improve organisational and technical measures and to implement automated monitoring systems for the condition of the contact network and its associated equipment. These measures will minimise the risk of accidents and ensure the reliable operation of urban electric transport systems.

Keywords: Urban electric transport, protection of overhead contact network, short circuit, energy recuperation, monitoring.

References

1. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii tramvaya (PTE tramvay)* [Rules for tram technical operation]. Moscow: Mintrans Rossii Publ., 2016. (In Russian)
2. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii trolleybusa (PTE trolleybus)* [Rules for trolleybus technical operation]. Moscow: Mintrans Rossii Publ., 2016. (In Russian)
3. *Instruktsiya po ustroystvu i obsluzhivaniyu kontaktnoy seti tramvaya i trolleybusa* [Instructions for the design and maintenance of tram and trolleybus contact networks]. Moscow: Mintrans Rossii Publ., 2005. (In Russian)
4. Afanasyev A. S. *Kontaktnye seti tramvaya i trolleybusa: uchebnik dlya SPTU* [Contact networks of trams and trolleybuses: textbook for SPTU]. Moscow: Transport Publ., 1988. 264 p. (In Russian)
5. Katsay A. V., Shevlyugin M. V. *Preobrazovanie energii rekuperatsii v gorodskom elektrotransporte* [Recuperation energy conversion in urban electric transport]. *Vestnik PNIPU* [PNIPU Bulletin]. 2022, Iss. 43, pp. 5–28. (In Russian)
6. Yablokov A. A., Gotovkina E. E. *Kompyuternoe modelirovanie v elektroenergetike i elektrotekhnike. Ch. 1. MATLAB* [Computer modeling in electric power engineering and electrical engineering. Part 1. MATLAB]. Ivanovo, 2021, 179 p. (In Russian)
7. Trofimov O. A., Glushkov N. V. *Issledovanie vliyaniya povysheniya napryazheniya i bol'shogo kolichestva rekuperatsionnykh tokov na bezopasnost' i nadezhnost' funktsionirovaniya gorodskoy kontaktnoy seti* [Research on the impact of voltage increase and a large number of recuperation currents on the safety and reliability of urban contact network operation]. *Vestnik nauki i tekhniki* [Bulletin of Science and Technology]. 2022, Iss. 12, pp. 45–56. (In Russian)

Received: June 24, 2025

Accepted: July 20, 2025

Author's information:

Alexander V. AGUNOV — PhD in Engineering, Professor; alexagunov@mail.ru

Alexander V SHCHERBAN — Head of the SSE “Energokhozhestvo”; en_gi@spbget.ru

Dmitry D. ARKHIPOV — Deputy Head of the PTO SSE “Energokhozhestvo”; digital5563@icloud.com

УДК 656.073.26

Совершенствование функционирования транспортно-логистического центра: концепция и система управления

Е. А. Кайкина, А. В. Новичихин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Кайкина Е. А., Новичихин А. В. Совершенствование функционирования транспортно-логистического центра: концепция и система управления // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 3. — С. 37–46. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-37-46

Аннотация

Цель: Повышение эффективности функционирования транспортно-логистических центров на основе совершенствования концепции работы и модернизация системы управления логистическими цепями в рамках регионального транспортно-логистического комплекса. **Методы:** Проведен комплексный анализ статистических данных об объемах перевезенных грузов и грузообороте страны, а также нормативных документов, включая федеральные законы и теоретические положения. Анализ направлен на выявление недостатков в функционировании системы и определение перспективных направлений исследования. Дополнительно применены методы теории управления для оптимизации работы транспортно-логистического центра. **Результаты:** Предложено совершенствование концепции работы транспортно-логистического центра на основе сокращения затрат на выполнение логистических операций, усовершенствована система управления на основе оптимизации параметров функционирования транспортно-логистического центра. **Практическая значимость:** Усовершенствованная концепция работы транспортно-логистического центра позволит повысить эффективность функционирования логистической цепи за счет оптимизации параметров работы.

Ключевые слова: Транспортно-логистический центр, концепция, система управления, транспорт, транспортно-логистический комплекс, логистическая цепь.

Введение

Определить актуальность темы исследования возможно на основе анализа состояния современного транспортно-логистического комплекса (далее — ТЛК) страны. Для этого проанализированы статистические данные об объемах перевезенных грузов и грузооборота страны за период с 2019 по 2024 г. (рис. 1, 2). Данные для этого были взяты с сайта Федеральной службы государственной статистики [1].

Основываясь на представленных статистических данных, можно сделать вывод, что, несмотря на ковидные ограничения, наблюдается положительная динамика объемов перевозимых грузов и грузооборота страны.

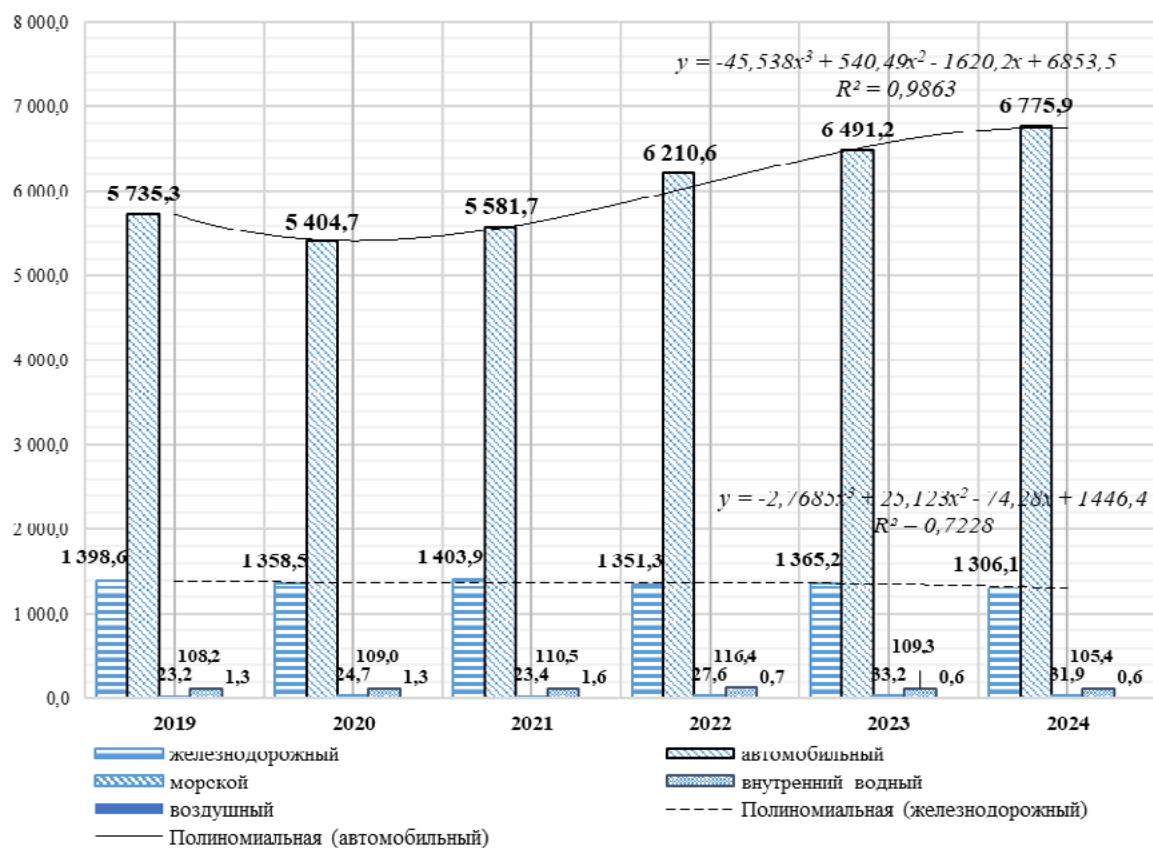


Рис. 1. Динамика перевезенных грузов по видам транспорта в России с 2019 по 2024 г. [1]

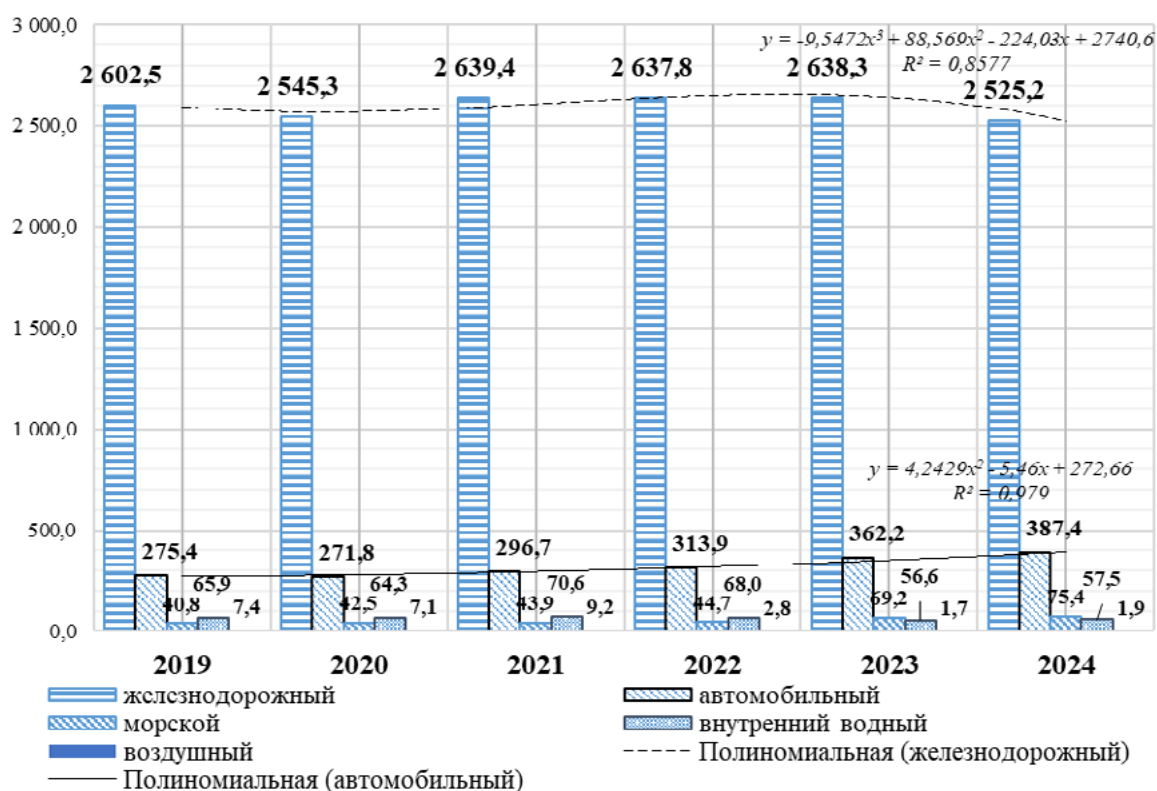


Рис. 2. Динамика грузооборота по видам транспорта в России с 2019 по 2024 г. [1]

Кроме анализа статистических данных необходимо также рассмотреть нормативные акты, такие как «Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года» [2] и «Стратегия развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 года» [3]. На основании этих документов можно сделать вывод о том, что в связи с современными внешнеэкономическими ограничениями и геополитическими изменениями наблюдается перераспределение грузопотоков и увеличение нагрузки на транспортную сеть России.

В связи с этим возросла потребность в модернизации и повышении эффективности функционирования контейнерных терминалов и пропускных пунктов на границе страны [2, 3], а также в оптимизации доставки грузов и сокращении транспортных издержек [4]. Для решения данных задач необходимо развитие логистических цепей поставок грузов, в частности мультимодальных перевозок, что было отражено в работах [5–9].

В статье рассматривается совершенствование функционирования **транспортно-логистического центра** (далее — ТЛЦ), благодаря которому производится обработка транзитных, экспортно-импортных и межрегиональных грузопотоков в условиях мультимодальных перевозок [3], что соответствует приведенным выше задачам совершенствования ТЛК страны.

Таким образом, в процессе анализа нормативных документов и теоретических положений о функционировании современного ТЛК страны были выявлены распространенные недостатки функционирования ТЛЦ:

1. Низкая перерабатывающая способность обусловлена растущим объемом перевозимых грузов и связана с техническим оснащением транспортно-логистических объектов, а также инфраструктурными ограничениями.

2. Высокая неопределенность распределения грузопотоков по видам транспорта, которая характеризуется короткими сроками планирования транспортно-логистических операций, а также невозможностью быстрого реагирования на внешние изменения.

3. Несоответствие уровня технического оснащения существующей инфраструктуры современным требованиям автоматизации и цифровизации. Недостаточное использование современных цифровых возможностей.

4. Низкая вариативность и отсутствие гибкости транспортно-логистических цепей обусловлены однообразием подходов к организации транспортно-логистических операций, что приводит к слабой адаптации логистических цепей к внешним рисковым факторам.

5. Сложность конкретизации математических моделей транспортно-логистического центра обусловлена низкой вариативностью математических подходов, что связано с необходимостью одновременного анализа разноразмерных параметров. Большинство из этих параметров представляют собой динамические

показатели, которые постоянно изменяются во времени, что существенно затрудняет построение точных и универсальных математических моделей.

На основе представленных недостатков предложено совершенствование концепции функционирования ТЛЦ, а также системы управления логистической цепочкой.

Совершенствование концепции функционирования транспортно-логистического центра

В статье предлагается усовершенствовать существующую концепцию работы транспортно-логистического центра (рис. 3).

Предлагаемая схема состоит из следующих блоков: эмпирических основ и предпосылок, практических задач, теоретических основ исследования, реализации концепции и критериев оценки достоверности.

Планируемая **реализация** предлагаемой концепции на реальном объекте выражена рядом решаемых задач:

1. Комплексирование эффективных методов функционирования транспортно-логистического центра для повышения эффективности функционирования за счет сокращения времени выполнения транспортно-логистических операций и снижения затрат.
2. Оптимизация организации погрузо-выгрузочных работ в условиях функционирования ТЛЦ за счет системы анализа и прогнозирования планирования эффективных маршрутов погрузо-разгрузочных механизмов (ПРМ).
3. Совершенствование типовых технологических процессов транспортно-логистического центра и их комплексирование.
4. Разработка программных продуктов функционирования ТЛЦ.
5. Адаптация математических моделей к различным условиям и этапам функционирования ТЛЦ.
6. Модельные эксперименты режимов работы ТЛЦ для анализа адекватности предлагаемой модели в условиях функционирования реального объекта.

Таким образом, особенностью предлагаемой усовершенствованной концепции работы ТЛЦ являются следующие принципы:

Во-первых, это **сокращение затрат** при выполнении операций по обработке грузов на ТЛЦ, что приводит к снижению стоимости перевозки в логистической цепи.

Во-вторых, внедрение современных **цифровых сервисов** в логистическую деятельность ТЛЦ, позволяющих оптимизировать процессы управления и контроля.

В-третьих, снижение **рисков** невыполнения сроков доставки со стороны перевозчика, а также повышение скорости реагирования логистической системы на возникающие внешние изменения.

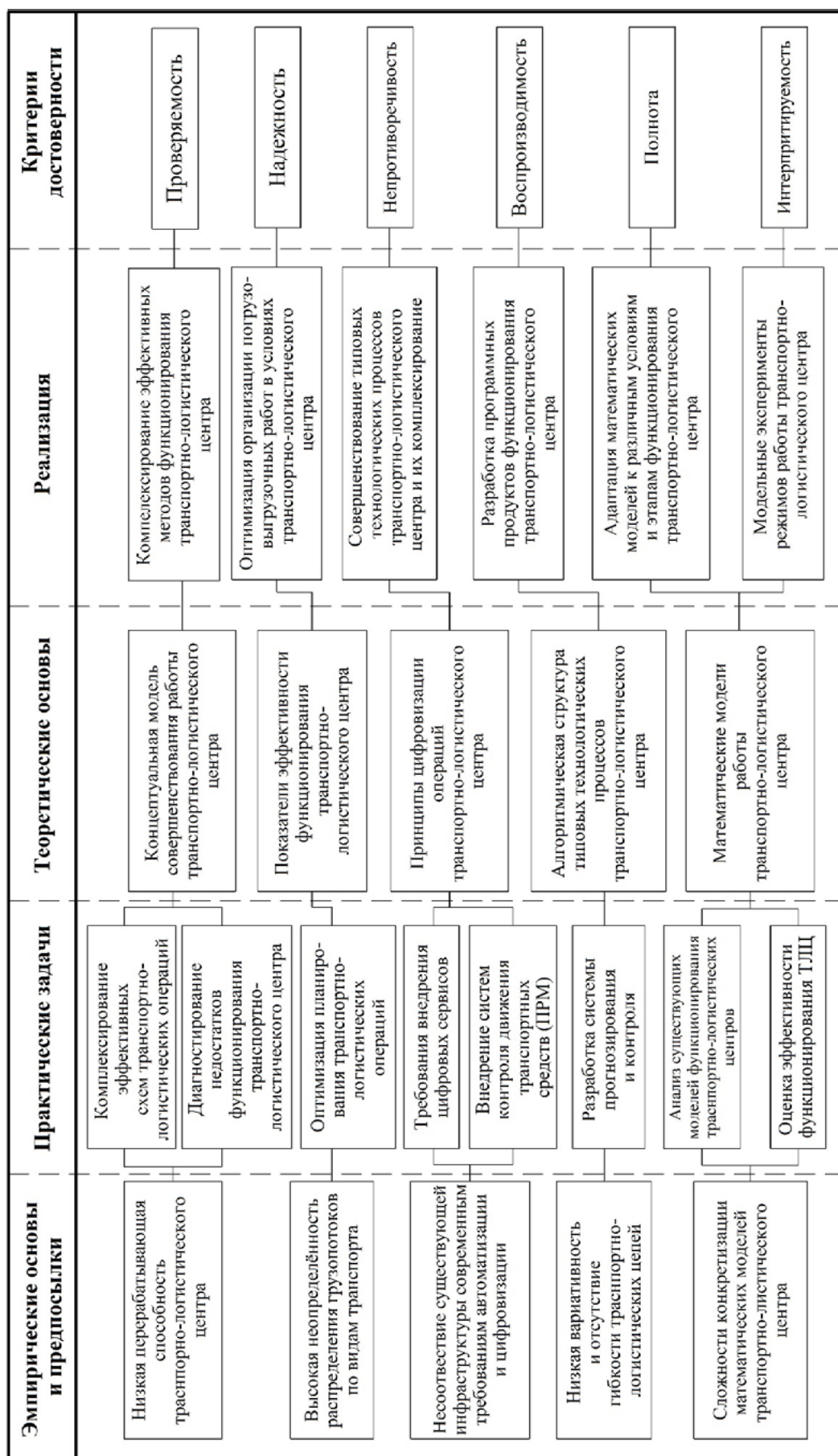


Рис. 3. Структурная схема совершенствования концепции функционирования ТЛЦ

В-четвертых, **комплексирование показателей** работы ТЛЦ, что обеспечивает возможность проведения упрощенного анализа эффективности его функционирования и способствует оптимизации процесса планирования работы.

Помимо представленного совершенствования концепции работы ТЛЦ, также необходимо эффективное управление логистической цепью с выделением объекта управления и управляющей системы [10].

Для этого на основе предлагаемой усовершенствованной концепции разработана укрупненная **схема системы управления логистическими цепями** (рис. 4), включающая в себя: входящий поток, исходящий поток, ограничения, ресурсы, управляющую систему и объект управления.

Входящий поток представлен вектором $\vec{a} = (A_1; A_2; A_3; A_4; A_5; A_6)$, параметры которого определяют потребность в перевозке грузов со стороны грузоотправителя (ГО) и грузополучателя (ГП). Параметры, входящие в состав данного вектора, представлены следующими показателями:

A_1 — объемы перевозок;

A_2 — участковая скорость на сети;

A_3 — перерабатывающая способность инфраструктуры;

A_4 — пропускная способность на сети;

A_5 — характеристики маршрутов;

A_6 — заявки на перевозку грузов.

Результирующий поток параметров представлен вектором $\vec{b} = (B_1; B_2; B_3; B_4; B_5; B_6)$, на основе параметров которого проводится оценка эффективности функционирования системы. Показателями оценки эффективности системы являются:

B_1 — техническая скорость;

B_2 — время доставки;

B_3 — отклонение от сроков доставки и других параметров перевозки;

B_4 — затраты на перевозку грузов;

B_5 — коэффициент порожнего пробега;

B_6 — резервы пропускной способности.

Объектом управления разработанной укрупненной схемы является региональный ТЛК, представленный на схеме множеством логистических цепочек, которые включают в себя последовательно расположенные пункты обработки грузов, в том числе ТЛЦ.

Грузопотоки в каждой логистической цепочке состоят из элементов $f(g; h)$, где g — пункт грузооборота, h — показатель функционирования, а также функция максимального значения параметров $f(g + r; h + p)$, где r — количество пунктов на сети, p — количество показателей работы пункта.

Представленные элементы (пункты) логистической цепи связаны функцией $F(i; j)$, где i — вид транспорта, j — грузопоток и максимальным значение функции $F(i + k; j + m)$, где k — количество видов транспорта, работающих на полигоне, l — количество грузопотоков.

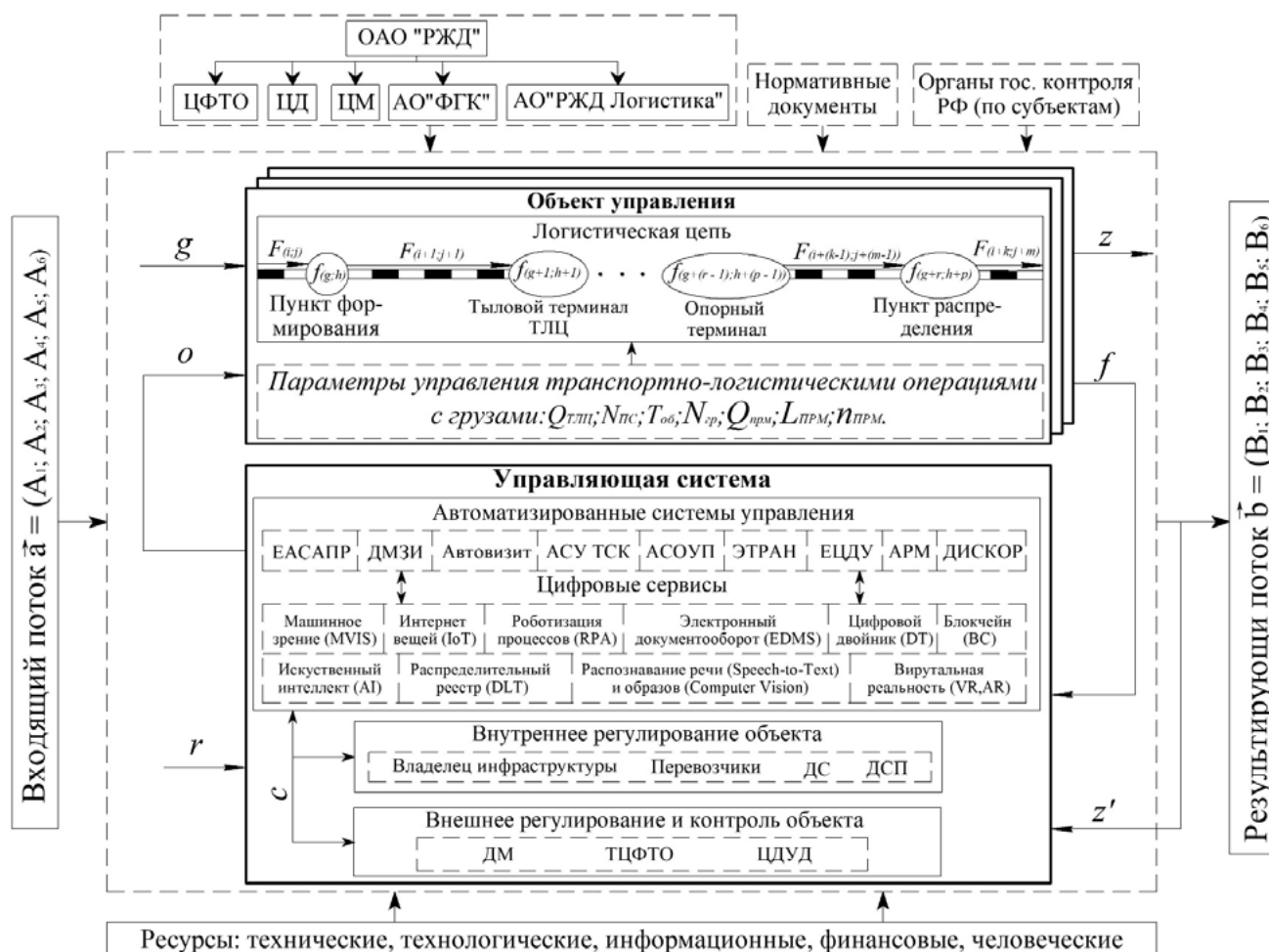


Рис. 4. Схема системы управления логистическими цепями при выделении объекта управления и управляющей системы

Объект управления включает в себя **параметры управления транспортно-логистическими операциями**, на основе которых предлагается оптимизировать работу объекта управления: $Q_{гр}$ — грузопотоки, $N_{гр}$ — перерабатывающая способность мест погрузки-выгрузки, $Q_{ПРМ}$ — производительность ПРМ, $L_{ПРМ}$ — длина маршрутов ПРМ по ТЛЦ, $n_{ПРМ}$ — количество ПРМ.

Внешними параметрами объекта управления являются векторы параметров входящих ($\vec{g}$) и исходящих потоков ($\vec{z}$) данных о работе объекта. Для оценки состояния объекта к управляющей системе направлен вектор ($\vec{f}$). В обратном направлении от системы управления направлен вектор ($\vec{i}$) воздействия на объект управления.

Управляющая система состоит из структурных частей, связанных вектором ($\vec{c}$), который обозначает цель управления объектом. Также управляющей системой производится оценка внешних факторов ($\vec{r}$) и изменяемых показателей работы объекта ($\vec{z}'$).

Ключевой особенностью предлагаемой усовершенствованной системы управления логистическими цепями поставок является оптимизация планирования работы ТЛЦ на основе представленных параметров с учетом ресурсов и ограничений.

Заключение

В статье проведен комплексный анализ состояния современного транспортно-логистического комплекса страны, в результате которого выявлены ключевые недостатки функционирования и определены приоритетные направления совершенствования работы транспортно-логистических центров.

Разработана и усовершенствована концепция функционирования ТЛЦ на основе оптимизации затрат при выполнении транспортно-логистических операций с применением современных цифровых сервисов. Планируемым результатом реализации данной концепции является повышение эффективности функционирования логистической цепи, существенное снижение затрат на перевозку грузов, минимизация рисков невыполнения установленных сроков доставки грузов, а также увеличение перерабатывающей и пропускной способности транспортной сети.

Предложена инновационная система управления логистическими цепями, учитывающая ключевые параметры оптимизации работы ТЛЦ. Дальнейшее развитие исследований предполагает детальный анализ существующих моделей и методов функционирования ТЛЦ с целью их последующего совершенствования и адаптации к современным условиям рынка.

Список источников

1. Федеральная служба государственной статистики / Росстат. — URL: <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport#> (дата обращения: 05.06.2025).
2. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года / Минтранс России. — URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/1/1010> (дата обращения: 05.06.2025).
3. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 года № 3363-р «Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года» / Правительство РФ. — URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/8/11577> (дата обращения: 05.06.2025).
4. Концепция создания терминально-логистических центров на территории Российской Федерации. — М.: ОАО «РЖД», 2012. — 79 с.
5. Елисеев С. Ю. Построение и оптимизация функционирования международных транспортно-логистических систем / С. Ю. Елисеев. — М.: ВИНТИ РАН, 2006. — 242 с.
6. Маликов О. Б. Складская и транспортная логистика в цепях поставок: учебное пособие / О. Б. Маликов. — СПб.: Питер, 2015. — 400 с.
7. Коровяковский Е. К. Проблемы развития системы логистических центров на железнодорожном транспорте / Е. К. Коровяковский // Логистические системы в глобальной экономике. — 2013. — № 3-1. — С. 121–125.
8. Балалаев А. С. Транспортно-логистическое взаимодействие при мультимодальных перевозках / А. С. Балалаев, Р. Г. Леонтьев. — М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2012. — 268 с.

9. Комарова Д. В. Транспортно-логистическая система России: состояние, основные показатели, проблемы и перспективы развития / Д. В. Комарова // Теория и практика современной науки. — 2018. — № 5. — С. 1192–1198.

10. Ковалев К. Е. Развитие научно-технических основ повышения эффективности функционирования транспортной системы при взаимодействии интенсивных и малодетальных линий / К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2021. — Т. 18. — Вып. 2. — С. 169–176.

Дата поступления: 29.06.2025

Решение о публикации: 29.07.2025

Контактная информация:

КАЙКИНА Екатерина Александровна — аспирант; kaikina_lkr@mail.ru

НОВИЧИХИН Алексей Викторович — д-р техн. наук, доц.; novitchihin@bk.ru

Improved Functioning of the Transport and Logistics Center: Concept and Management

E. A. Kaikina, A. V. Novitchihin

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Kaikina E. A., Novichikhin A. V. Improved Functioning of the Transport and Logistics Center: Concept and Management. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 3, pp. 37–46. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-37-46

Summary

Purpose: To enhance the efficiency of the transport and logistics centre by improving the operational concept and modernizing the logistics chain management system. This will be achieved within the framework of the regional transport and logistics complex. **Methods:** A comprehensive statistical analysis of the volume of transported goods and cargo turnover in Russia. This will be complemented by an analysis of regulatory documents, federal laws and theoretical provisions. The aim of this analysis is to identify any shortcomings in the functioning and research areas. Finally, a management theory method will be employed to optimize the work of the transport and logistics centre. **Results:** The proposed enhancement of the transport and logistics centre concept is founded on the reduction of costs for logistics operations and the optimization of management systems. **Practical significance:** The refined conceptualization of the transport and logistics centre operation is expected to enhance the efficiency of the logistics chain through the optimization of operational parameters.

Keywords: Transport and logistics centre, concept, management system, transport, transport and logistics complex, logistics chain.

References

1. *Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki* [Federal State Statistics Service]. Available at: <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport#> (accessed: June 5, 2025). (In Russian)

2. *Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda* [Railway transport development strategy in the Russian Federation until 2030]. Available at: <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport#> (accessed: June 5, 2025). (In Russian)
3. *Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 27 noyabrya 2021 goda № 3363-r "Ob utverzhdenii Transportnoy strategii Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda"* [Decree of the Government of the Russian Federation dated November 27, 2021 № 3363-r "On approval of the Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period until 2035"]. Available at: <https://mintrans.gov.ru/documents/8/11577> (accessed: June 5, 2025). (In Russian)
4. *Kontseptsiya sozdaniya terminal'no-logisticheskikh tsentrov na territorii Rossiyskoy Federatsii* [Concept of creating terminal logistics centers in the territory of the Russian Federation]. Moscow: OAO "RZhD" Publ., 2012, 79 p. (In Russian)
5. Eliseev S. Yu. *Postroenie i optimizatsiya funktsionirovaniya mezhdunarodnykh transportno-logisticheskikh sistem* [Construction and optimization of international transport and logistics systems operation]. Moscow: VINITI RAN Publ., 2006, 242 p. (In Russian)
6. Malikov O. B. *Skladskaya i transportnaya logistika v tsepyakh postavok: uchebnoe posobie* [Warehouse and transport logistics in supply chains: textbook]. Saint Petersburg: Piter Publ., 2015, 400 p. (In Russian)
7. Korovyakovskiy E. K. Problemy razvitiya sistemy logisticheskikh tsentrov na zheleznodorozhnom transporte [Problems of development of logistics centers system in railway transport]. *Logisticheskie sistemy v global'noy ekonomike* [Logistics systems in global economy]. 2013, Iss. 3-1, pp. 121–125. (In Russian)
8. Balalaev A. S., Leont'ev R. G. *Transportno-logisticheskoe vzaimodeystvie pri mul'timodal'nykh perevozkakh* [Transport and logistics interaction in multimodal transportation]. Moscow: FGBOU "Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniya na zheleznodorozhnom transporte" Publ., 2012, 268 p. (In Russian)
9. Komarova D. V. Transportno-logisticheskaya sistema Rossii: sostoyanie, osnovnye pokazateli, problemy i perspektivy razvitiya [Transport and logistics system of Russia: state, main indicators, problems and development prospects]. *Teoriya i praktika sovremennoy nauki* [Theory and practice of modern science]. 2018, Iss. 5, pp. 1192–1198. (In Russian)
10. Kovalev K. E., Novichikhin A. V. Razvitie nauchno-tekhnicheskikh osnov povysheniya effektivnosti funktsionirovaniya transportnoy sistemy pri vzaimodeystvii intensivnykh i malodeyatel'nykh liniy [Development of scientific and technical foundations for improving the efficiency of the transport system operation during interaction of intensive and low-activity lines]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. Saint Petersburg: PGUPS Publ., 2021, vol. 18, Iss. 2, pp. (In Russian)

Received: June 29, 2025

Accepted: July 29, 2025

Author's information:

Ekaterina A. KAIKINA — Postgraduate Student; kaikina_lkr@mail.ru

Aleksey V. NOVITCHIHIN — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; novitchihin@bk.ru

УДК 621.311.238

Оценка целесообразности создания собственной генерации на основе укрупненных расчетов газотурбинных установок

М. В. Шевлюгин, М. Р. Ради

Российский университет транспорта (РУТ), Российская Федерация, 127994, ГСП-4, Москва, ул Образцова, 9, стр. 9

Для цитирования: Шевлюгин М. В., Ради М. Р. Оценка целесообразности создания собственной генерации на основе укрупненных расчетов газотурбинных установок // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 3. — С. 47–60. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-47-60

Аннотация

Цель: Обосновать технико-экономическую целесообразность строительства локальной газотурбинной электростанции (ГТЭС) для покрытия 36 % дефицита мощности в г. Тартусе (Сирия) и повышения надежности энергоснабжения. **Методы:** Использована укрупненная методика оценки: определение требуемой установленной мощности с 15%-ным резервом; расчет удельного расхода природного газа при КПД 34 %; прогноз годовой выработки при коэффициенте использования 0,7; формирование CAPEX и OPEX на основе мировых цен на оборудование и топливо; вычисление полной себестоимости электроэнергии и простого срока окупаемости. **Результаты:** ГТЭС совокупной мощностью 60 МВт полностью ликвидирует текущий дефицит и создает 10%-ный резерв роста нагрузки. При цене газа 0,25 \$/м³ ориентировочная себестоимость составляет 0,075 \$/кВт · ч (около 7–8 руб/кВт · ч), что вдвое дешевле дизель-генераторов. Инвестиции порядка \$ 52 млн окупаются за 3–4 года при тарифе реализации 0,12 \$/кВт · ч; рост тарифа до 0,15 \$/кВт · ч сокращает окупаемость до 2 лет. По сравнению с дизельной схемой годовое сокращение выбросов CO₂ достигает 100 тыс. т. **Практическая значимость:** Предложенный алгоритм позволяет за один рабочий день выполнить достоверный экспресс-анализ проектов распределенной газотурбинной генерации в регионах с разрушенной системой электроснабжения. Модульность оборудования (поставка и ввод 8–10 месяцев) и конкурентная себестоимость делают газотурбинную электростанцию (ГТЭС) оптимальным инструментом быстрого восстановления электрообеспечения, тогда как солнечные станции остаются лишь вспомогательным ресурсом пиковой генерации.

Ключевые слова: Солнечная энергия, распределенная генерация, технико-экономический анализ, энергосистема Тартуса, возобновляемые источники энергии (ВИЭ).

Введение

Энергокризис в Сирийской Арабской Республике (САР) привел к тому, что центральная сеть покрывает лишь около 64 % спроса Тартуса. Дефицит составляет 36 МВт, при прогнозируемом увеличении до 56 МВт к 2040 г. [1–3]. Солнечная фотоэлектрическая станция (ФЭС) мощностью 56 МВт, несмотря на снижение выбросов, не способна устранить ночной дефицит энергии [4, 5]. Наиболее реалистичным решением является создание локальной газотурбинной станции с суммарной мощностью 60 МВт, подключаемой к сети 20 кВ.

При коэффициенте полезного действия установки (КПД) $\eta_e = 35\%$ удельный расход топлива равен $b_e = 0,28 \text{ м}^3 / \text{кВт} \cdot \text{ч}$. Себестоимость составляет примерно 7–8 руб. за кВт · ч, в то время как у дизельных генераторов она превышает

18 руб. за кВт · ч [6, 7]. Капитальные затраты (CAPEX) оцениваются в пределах $c_{cap} = 800\$ / \text{кВт}$; ввод 6–12 мес., окупаемость — менее 5 лет. Следовательно, применение модульной газотурбинной установки (ГТУ) позволяет решить проблему нехватки энергии, повысить уровень надежности и обеспечить конкурентоспособную стоимость электроэнергии при относительно небольших инвестициях.

ТАБЛИЦА 1. Основные принятые параметры для оценки проекта ГТУ

Показатель	Значение	Примечание
Дефицит мощности города	36 МВт (до 56 МВт к 2040 г.)	Оценка дефицита на 2025–2040 гг. [1]
Предлагаемая установка (ГТУ)	Одна или несколько ГТУ суммарно ~ 60 МВт	Покрытие текущего и перспективного дефицита
Топливо	Природный газ (метан)	Возможна транспортировка по трубопроводу или в виде сжиженного природного газа
Низшая теплота сгорания газа	35 МДж/м ³ (9,7 кВт · ч/м ³)	Для расчета удельного расхода топлива
Электрический КПД ГТУ	34–36 %	Для простой газотурбинной установки [6]
Удельный расход топлива	0,28 м ³ газа/кВт · ч (0,22 кг у. т./кВт · ч)	При КПД 35 % (расчетно)
Капитальные затраты (CAPEX)	~ 800 \$/кВт установленной мощности	Оценочно для ГТУ среднего размера
Эксплуатационные затраты (OPEX)	2–3 % от CAPEX в год	Без учета топлива (обслуживание)
Цена топлива (природный газ)	0,20–0,30 \$/м ³ (внутр. цены)	Оценка по ближневосточным рынкам
Тариф продажи электроэнергии	0,10–0,15 \$/кВт · ч (условно)	Для оценки окупаемости (близко к себестоимости)

Как следует из данных, представленных в табл. 1, для компенсации недостатка мощности в размере примерно 36 мегаватт с учетом увеличения потребления необходимо обеспечить дополнительную генерацию в диапазоне от 50 до 60 мегаватт. В качестве наиболее подходящего топлива выбран природный газ. Он является оптимальным выбором с точки зрения экономической эффективности и экологической безопасности. При сжигании природного газа удельный выброс углекислого газа (CO₂) примерно на 30 % ниже, чем при использовании дизельного топлива [6].

Постановка задачи

Цель — обосновать покрытие дефицита мощности $P_{def} = 36 \text{ МВт}$ (56 МВт к 2040 г.) в г. Тартусе путем ввода локальной газотурбинной электростанции (ГТУ) в режиме распределенной генерации, работающей параллельно с ЦЭС. Необходимо:

- определить требуемую установленную мощность;
- оценить годовой расход газа:

$$V_{year} = b_e P_{\Sigma} K_u T_y,$$

также варианты его доставки (трубопровод/СПГ);

- рассчитать капитальные затраты:

$$CAPEX = c_{cap} P_{\Sigma}$$

и эксплуатационные затраты:

$$OPEX = Z_{fuel} + Z_{maint};$$

- вывести интегральные показатели:

$$C_{gen} = \frac{OPEX}{W}, T_{pb} = \frac{CAPEX}{(C_{tar} - C_{gen})W};$$

- проверить техническую и экономическую целесообразность.

В связи с недостаточностью исходных данных используется метод приближенных расчетов с использованием стандартных коэффициентов [1, 8]. Это позволяет оперативно проанализировать возможные варианты и принять решение о необходимости разработки детального технико-экономического обоснования (ТЭО). В рамках ТЭО будут рассмотрены такие аспекты, как схемы выдачи мощности, логистика топлива, релейная защита и автоматика (РЗА), а также влияние на работу сети.



Рис. 1. Схема энергоснабжения с собственной генерацией в г. Тартусе

Материалы и методы

Алгоритм укрупненной технико-экономической оценки (рис. 2) включает пять последовательных шагов.

1. Определение мощности. Расчетная установленная мощность выбирается как максимум прогнозного дефицита с резервом 10–20 % [8, с. 38]:

$$P_{req} = (P_{def}^{max} + \Delta P)(1 + \alpha_r).$$

При максимальном прогножном дефиците мощности $P_{def}^{max} = 56$ МВт, дополнительной прибавке к дефициту на ближайшую перспективу (рост нагрузки) $\Delta P = 4$ МВт и доле резерва мощности $\alpha_r = 0,05$ получаем $P_{req} = 60$ МВт [1].

2. Топливные показатели. КПД простой ГТУ принят коэффициент полезного действия газотурбинной установки $\eta_e = 0,35$ (типовой диапазон 15–25 МВт) [6]; удельный расход газа:

$$b_e = \frac{1}{\eta_e q_{LHV}} = 0,285 \text{ м}^3 / \text{кВт} \cdot \text{ч};$$

при низшей теплоте сгорания природного газа:

$$q_{LHV} = 9,7 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \cdot \text{м}^{-3};$$

3. Годовая выработка и потребление топлива. Для коэффициента использования $K_u = 0,70$:

$$W = P_{req} K_u T_y;$$

$$W = 3,69 \cdot 10^8 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

где T_y — количество часов в году.

Годовой расход газа:

$$V_{year} = b_e W = 1,05 \cdot 10^8 \text{ м}^3;$$

где W — годовая выработка электрической энергии, кВт · ч.

4. Затраты. *CAPEX* по удельному нормативу: $c_{cap} = 800$ \$ / кВт [9], в итоге капитальные затраты на ввод станции составляют $Z_{cap} = 48$ млн \$. *OPEX* состоит из стоимости топлива и обслуживания (цена природного газа $C_{gas} = 0,25$ \$ / м³ [6], доля затрат на обслуживание от капитальных затрат в год $\beta = 2,5$ %): ежегодные расходы на топливо $Z_{fuel} = 26,3$, ежегодные расходы на обслуживание $Z_{maint} = 1,2$ млн \$ / год; суммарные ежегодные эксплуатационные расходы $Z_{opex} = 27,5$ млн \$ / год. Структура расходов: топливо — 86 %, амортизация — 11 %, обслуживание — 3 % [8].

5. Интегральные показатели. Удельная стоимость выработанной электроэнергии

$$C_{gen} = \frac{Z_{opex}}{W} = 0,074 \$ / \text{кВт} \cdot \text{ч} (= 7,2 \text{ руб.})$$

в 3–4 раза ниже дизельных источников (0,25 \$/кВт·ч) [7] и на 40 % ниже приведенной стоимости электроэнергии солнечной фотоэлектрической станции (ФЭС) (0,12 \$/кВт·ч) [5]. При тарифе реализации 0,10 \$/кВт·ч простой срок окупаемости:

$$T_{pb} = \frac{Z_{cap}}{(C_{tar} - C_{gen})W} = 3,4 \text{ года};$$

Рост тарифа до 0,15 \$/кВт·ч сокращает T_{pb} до 1,7 г, тогда как полный дизельный сценарий окупается менее чем за год за счет экономии 0,176 \$/кВт·ч.

Методика, основанная на нормативных коэффициентах и усредненных данных, позволяет оперативно оценить жизнеспособность проекта: ГТУ 60 МВт ликвидирует дефицит, обеспечивает себестоимость менее 0,08 \$/кВт·ч и окупаемость менее 5 лет, что подтверждает его техническую и экономическую целесообразность.



Рис. 2. Алгоритм укрупненной оценки проекта собственной генерации на базе ГТУ

Результаты

На базе вышеописанной методики получены количественные оценки, подтверждающие возможность и эффективность создания собственной генерации на базе ГТУ для г. Тартуса. Ключевые результаты сведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Результаты укрупненного технико-экономического расчета

Показатель	Значение (при 60 МВт ГТУ)
Покрытие дефицита мощности	Полное (100 % при текущем дефиците 36 МВт; резерв до 60 МВт)
Годовая выработка электроэнергии	$3,7 \cdot 10^8$ кВт · ч (при ср. нагрузке ~ 70 %)
Годовой расход топлива (газ)	$1,05 \cdot 10^8$ м ³ ($8,4 \cdot 10^4$ т у. т. в год)
Ежегодные затраты на топливо	26–30 млн \$/год (при 0,25 \$/м ³ газа)
Прочие эксплуатац. расходы	1–1,5 млн \$/год
Ориентировочная себестоимость энергии	0,07–0,09 \$/кВт · ч (5–7 руб./кВт · ч)
Сравнение с дизельной энергией	ГТУ в 3–4 раза дешевле по себестоимости
Капитальные вложения (единоврем.)	45–50 млн \$ (3,4–3,8 млрд руб.)
Срок окупаемости проекта	3–4 года (в зависимости от тарифа/эффекта)
Экономия выбросов CO ₂	100 тыс. т/год (в сравнении с дизелями)

Расчеты подтверждают, что номинальная мощность проектируемой газотурбинной электростанции $P_{\Sigma} = 60$ МВт превосходит прогнозный дефицит мощности $P_{def}^{max} = 36$ МВт и создает резерв:

$$\Delta P = P_{\Sigma} - P_{def}^{max} = 24 \text{ МВт}$$

для покрытия пиковой нагрузки и отказов оборудования. Тем самым обеспечивается переход энергосистемы Тартуса к классу N-1-устойчивости [1].

Полная себестоимость, рассчитанная как

$$C_{gen} = \frac{Z_{fuel} + Z_{maint} + Z_{dep}}{W} = 0,074 \text{ \$ / кВт · ч},$$

соответствует 7,2 руб./кВт · ч, что в 3–4 раза ниже удельных затрат розничной дизельной генерации (0,25–0,30 \$/кВт · ч) [7] и на 40 % ниже стоимости электроэнергии солнечной фотоэлектрической станции (ФЭС) в Сирии (0,14–0,17 \$/кВт · ч) [5]. Даже с учетом довоенных тарифов (4 руб./кВт · ч) прирост платы потребителей не превышает 80 %, но компенсируется круглосуточной доступностью электроэнергии.

Простой срок окупаемости определяется:

$$T_{pb} = \frac{Z_{cap}}{(C_{tar} - C_{gen})W}.$$

При тарифе $C_{tar} = 0,10 \$ / \text{кВт} \cdot \text{ч}$ и исходных данных получено $T_{pb} = 3,4$ г. Для маржинальной цены $C_{tar} = 0,15 \$ / \text{кВт} \cdot \text{ч}$ окупаемость сокращается до 1,7 г., что сравнимо с когенерационными ГТУ при 100 % тепловой полезности [6, с. 91]. Порог тарифа, при котором срок окупаемости менее 5 лет, легко вывести:

$$C_{tar(\min)} = C_{gen} + \frac{Z_{cap}}{5W} = 0,087 \$ / \text{кВт} \cdot \text{ч},$$

то есть экономическая привлекательность сохраняется при продаже лишь на 17 % выше себестоимости.

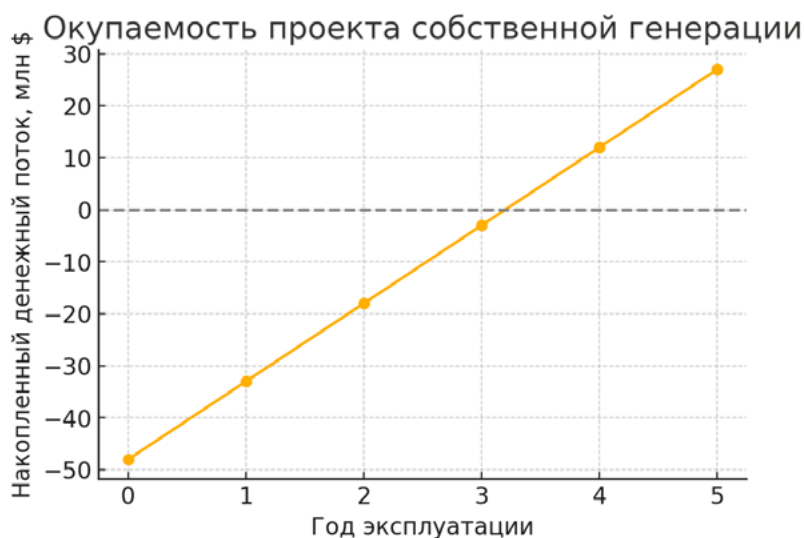


Рис. 3. Окупаемость проекта при умеренном тарифе продажи электроэнергии

Чувствительность к цене газа

Себестоимость линейно зависит от стоимости топлива:

$$\frac{C_{gen}}{C_{gas}} = b_e = 0,285 \text{ м}^3 / \text{кВт} \cdot \text{ч};$$

Удвоение цены газа до $C_{gas}^- = 0,50 \$ / \text{м}^3$ приводит к:

$$C_{gen}^- = C_{gen} + b_e (C_{gas}^- - C_{gas}) = 0,147 \$ / \text{кВт} \cdot \text{ч},$$

что остается конкурентоспособным относительно дизельных установок (разница $\sim 0,11 \$ / \text{кВт} \cdot \text{ч}$). Следовательно, проект сохраняет рентабельность при диапазоне цен 0,18–0,50 \$/м³ газа.

Вариация коэффициента использования мощности

Если коэффициент загрузки K_u снизится до 0,4 (резкое падение спроса или ограничение топлива), то:

$$C_{gen}^- = \frac{Z_{fuel}K_u + Z_{const}}{WK_u} = \frac{C_{gen}}{K_u} + C_{corr};$$

$$Z_{const} = Z_{maint} + Z_{dep},$$

где Z_{const} — годовые постоянные расходы;
 Z_{maint} — расходы на обслуживание;
 Z_{dep} — амортизационная доля капитальных затрат;
 C_{corr} — себестоимость при произвольном K_u .

При $K_u = 0,4$ себестоимость возрастает до 0,128 \$/кВт·ч, а T_{pb} удлиняется до 6–7 лет. Тем не менее, учитывая хронический дефицит электроэнергии и развитие портовой инфраструктуры (рост нагрузки до 2040 г. прогнозируется +55 %) [1], столь низкий коэффициент использования K_u выглядит маловероятным.

Итак, газотурбинная распределенная генерация остается оптимальным вариантом: она сочетает уверенное покрытие нагрузки, умеренную себестоимость и окупаемость менее 5 лет даже при неблагоприятных ценовых сценариях. Проект минимизирует энергетические риски Тартуса и формирует технологическую базу для дальнейшей гибридизации с ВИЭ, обеспечивая устойчивое развитие городской энергосистемы.

Обсуждение. Ограничения и допущения проекта

1. Топливо и логистика

Расчет базируется на гарантированной подаче природного газа годовым объемом $V_{year} = 1,05 \cdot 10^8 \text{ м}^3$. При отсутствии магистрального трубопровода к Тартусу целесообразно сравнить два сценария:

$$C_{gas}^{pipe} = C_{well} + C_{trans};$$

$$C_{gas}^{LNG} = C_{well} + C_{liq} + C_{reg};$$

где C_{gas}^{pipe} — удельная цена природного газа на станции при трубопроводных поставках;
 C_{gas}^{LNG} — удельная цена природного газа на станции при поставках СПГ (сжиженного природного газа);

C_{trans} — транспортные затраты (доставка по трубопроводу);
 C_{well} — цена сырья на устье;
 C_{liq} и C_{reg} — стоимости сжижения и регазификации соответственно.
 Даже при премии $\Delta C = C_{gas}^{LNG} - C_{gas}^{pipe} \leq 0,10 \$ / \text{м}^3$ рост удельной себестоимости:

$$\Delta C_{gen} = b_e \Delta C = 0,028 \$ / \text{кВт} \cdot \text{ч},$$

что оставит $C_{gen} \leq 0,105 \$ / \text{кВт} \cdot \text{ч}$ конкурентным по сравнению с дизелем [7]. На начальном этапе допускается двухтопливный режим (газ/дизель); дополнительная топливная надбавка оценивается по:

$$C_{mix} = \gamma C_{gas} + (1 - \gamma) C_{diesel};$$

где γ — доля газовой составляющей; при $\gamma \geq 0,6$ интегральная себестоимость остается ниже $0,15 \$ / \text{кВт} \cdot \text{ч}$.

2. Встраивание в сеть

Присоединение блока мощностью $P = 60 \text{ МВт}$ к распределительным шинам с напряжением 20 кВ проверяется по критерию термической устойчивости:

$$I_{\max} = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos \varphi} = \frac{60}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 0,95} = 1,82 \text{ кА};$$

где P — установленная электрическая мощность;

U — линейное напряжение присоединения;

$\cos \varphi$ — коэффициент мощности;

$I_{\max}$ — расчетный ток на стороне 20 кВ.

Линий 20 кВ сечением 300 мм² достаточно (допустимый длительный ток 2–2,2 кА) [1]. Сокращение потерь ΔP_{Σ} при локальной генерации оценивается:

$$\Delta P_{\Sigma} = R_{eq} (I_{centr}^2 - I_{loc}^2) \leq 0,7 \text{ МВт},$$

где R_{eq} — эквивалентное активное сопротивление участка сети, Ом;

I_{centr} и I_{loc} — ток в питающих линиях при централизованной схеме и при наличии локальной генерации соответственно, А.

Что подтверждает расчетное снижение потерь на 2,1 % [7]. Для двустороннего перетока требуется модернизация РЗА и внедрение автоматической разгрузки

при $\frac{df}{dt} > 0,5 \text{ Гц/с}$ [10].

3. Финансирование и тарифное регулирование

При ставке дисконтирования $r = 10\%$ внутренняя норма доходности определяется:

$$IRR = \left(\frac{\Pi_{net}}{Z_{cap}} + 1 \right)^{1/n} - 1;$$

$$\Pi_{net} = (C_{tar} - C_{gen})W;$$

где Π_{net} — годовой чистый операционный денежный поток проекта.

Для $C_{tar} = 0,12 \$ / \text{кВт} \cdot \text{ч}$ получаем $IRR = 17,9\% (> r)$, что привлекательно для частного капитала даже без субсидий. Государственно-частная модель (ГЧП) с «гарантированным выкупом» позволит спрогнозировать денежный поток и снизить риски.

4. Совместимость с ВИЭ

Пиковая мощность солнечной ФЭС P_{PV} уменьшается, вечерний провал нагрузки ΔP_{eve} по балансу:

$$P_{GTU(eve)} = P_{def}^{max} - P_{PV};$$

где $P_{GTU(eve)}$ — требуемая мощность газотурбинной установки в вечерний период (при минимальной солнечной генерации), мегаватт.

$P_{PV} \rightarrow 0$ после 18:00 [4]. Газотурбина с резервом по требуемой скорости набора/сброса мощности $\Delta P_{ramp} = 10\%/\text{мин}$ [6] оперативно компенсирует дискретность солнечного профиля. Позднее установка может быть переведена в парогазовый цикл; интегральный КПД вырастет, электрический КПД парогазового цикла достигнет $\eta_{CC} = 0,52 - 0,55$, а удельный расход снизится до $b_e^{CC} = 0,195 \text{ м}^3 / \text{кВт} \cdot \text{ч}$.

5. Репликация опыта

Методика применима ко всем регионам CAPEX, где мощность дефицита $P_{def} > 10 \text{ МВт}$. При нормализованных вводных (газ $\leq 0,30 \$/\text{м}^3$, $CAPEX \leq 900 \$/\text{кВт}$, $K_u \geq 0,55$) условие окупаемости T_{pb} менее 6 лет выполняется. Таким образом, газотурбинная схема является масштабируемым базовым решением, а солнечные и ветровые мощности целесообразно рассматривать лишь как вспомогательные источники резервируемой генерации.

Заключение

Проведенная укрупненная оценка показала, что газотурбинная электростанция установленной мощностью полностью покрывает текущий дефицит нагрузки Тартуса и формирует резерв на перспективу до 2040 г. [1]. Размещение генерации на уровне напряжения 20 кВ снижает потери сети на 2,1 % и выравнивает напряжение в распределительных узлах [7].

Сравнительный анализ показал, что газотурбинная схема обеспечивает минимальную приведенную стоимость электроэнергии $C_{gen} = 7 - 8$ руб / кВт · ч, тогда как дизель-генерация и сетевые ФЭС стоят более 18 руб/кВт · ч и более 12 руб/кВт · ч соответственно [5, 7]. Высокий КПД (35 %) и модульность оборудования позволяют ввести станцию за 6–12 мес. при капитальных затратах 48 млн \$. Простая окупаемость проекта составляет $T_{pb} = 1 - 5$ лет в зависимости от тарифной модели; даже при двукратном удорожании газа ($C_{gas} = 0,5$ \$ / м³) внутренняя норма доходности остается выше 10 %.

Методика экспресс-оценки, основанная на ограниченном наборе исходных данных, подтверждает техническую и экономическую целесообразность газотурбинной генерации и может быть реплицирована в других энергодефицитных регионах Сирии.

Таким образом, создание собственной газотурбинной электростанции в Тартусе является реалистичным, экономически оправданным шагом, который в кратчайшие сроки ликвидирует энергодефицит, повысит надежность электроснабжения и заложит основу для устойчивого развития городской энергосистемы.

Список источников

1. Ради М. Р. Разработка модели системы электроснабжения г. Тартус (САР) с распределенной генерацией / М. Р. Ради // Сб. научн. трудов IV Междунар. науч.-практ. конф. «Наука в современном мире: актуальные вопросы, достижения и перспективы развития». — Анапа: НИЦ «Иннова», 2025. — С. 23–27.
2. Аль-Мухаммад А. Возобновляемые источники энергии в Сирии / А. Аль-Мухаммад // Renewable Energy. — 2001. — Vol. 24. — Pp. 365–371.
3. Ministry of Electricity of Syria / Министерство электроэнергии Сирии. — URL: www.moe.gov.sy (дата обращения: 12.04.2025).
4. Шевлюгин М. В. Технико-экономический анализ интеграции солнечных электростанций в энергосистему Тартуса (САР) / М. В. Шевлюгин, М. Р. Ради // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 1. — С. 201–210. — DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-201-210.
5. Рамадан А. Технико-экономическая оценка сетевой солнечной фотоэлектрической станции в Сирии / А. Рамадан, В. Элистратов // Applied Solar Energy. — 2019. — Т. 55. — Вып. 3. — С. 174–188.

6. Махнутин А. К. О вопросах применения газотурбинных установок и парогазовых установок в энергетике / А. К. Махнутин, Б. В. Кавалеров // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. — 2015. — № 15. — С. 84–92.
7. Зайченко В. М. Сравнение характеристик распределенных и централизованных схем энергоснабжения / В. М. Зайченко, А. А. Чернявский // Промышленная энергетика. — 2016. — № 1. — С. 2–8.
8. Удинцев Д. Н. Выбор числа и мощности генерирующего оборудования энергоцентров в автономных системах электроснабжения и в системах с распределенной генерацией / Д. Н. Удинцев, Г. В. Шведов, М. Е. Шонин // Энергетик. — 2020. — № 2. — С. 37–43.
9. Международное агентство по возобновляемым источникам энергии (IRENA). Затраты на выработку электроэнергии на основе ВИЭ — 2023 год. — URL: <https://www.irena.org/Publications/2024/Sep/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2023> (дата обращения: 12.04.2025).
10. Батенин В. М. Концепция развития распределенной энергетики в России / В. М. Батенин, В. М. Зайченко, А. И. Леонтьев, А. А. Чернявский // Известия РАН. Энергетика. — 2017. — № 1. — С. 3–18.

Дата поступления: 05.06.2025

Решение о публикации: 31.08.2025

Контактная информация:

РАДИ Мангаль Рияд — аспирант; manhalradi67@gmail.com

ШЕВЛЮГИН Максим Валерьевич — д-р техн. наук, доц.; mx_sh@mail.ru

Feasibility Assessment of Establishing Local Power Generation Based on Consolidated Calculations of Gas Turbine Installations

M. V. Shevlyugin, M. R. Radi

Russian University of Transport (RUT (MIIT), 9, bld. 9, Obratsova str., GSP-4, 127994, Moscow, Russian Federation

For citation: Shevlyugin M. V., Radi M. R. Feasibility Assessment of Establishing Local Power Generation Based on Consolidated Calculations of Gas Turbine Installations. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 3, pp. 47–60. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-47-60

Summary

Purpose: To substantiate the techno-economic feasibility of constructing a local gas-turbine power plant (GTPP) to cover the 36 % capacity shortfall in Tartus (Syria) and to enhance supply reliability. **Methods:** A high-level assessment was performed: (i) determination of the required installed capacity with a 15 % reserve; (ii) calculation of specific natural-gas consumption at 34 % thermal efficiency; (iii) projection of annual output at a 0.7 capacity factor; (iv) estimation of CAPEX and OPEX using global equipment and fuel prices; and (v) computation of the levelized cost of electricity (LCOE) and simple payback period. **Results:** A 60 MW GTPP eliminates the current deficit and provides a 10 % reserve for demand growth. With gas priced at 0.25 USD m⁻³, the LCOE is 0.075 USD kWh⁻¹ ($\approx$ 7–8 RUB kWh⁻¹), three times lower than diesel generation. An

investment of approximately 52 million USD is recovered in 3–4 years at a tariff of 0.12 USD kWh⁻¹; increasing the tariff to 0.15 USD kWh⁻¹ shortens payback to 2 years. Replacing diesel units reduces annual CO₂ emissions by about 100 kt. **Practical significance:** The proposed algorithm enables a reliable one-day express appraisal of distributed gas-turbine projects in regions with a damaged power system. Equipment modularity (8–10 months for delivery and commissioning) and competitive LCOE position the GTPP as the optimal tool for rapid restoration of electricity supply, while solar plants remain a supplementary source for daytime peak demand.

Keywords: Solar energy, distributed generation, techno-economic analysis, Tartus energy system, renewable energy sources (RES).

References

1. Radi M. R. Razrabotka modeli sistemy elektrosnabzheniya g. Tartus (SAR) s raspredelennoy generatsiyey [Development of a power supply system model for the city of Tartus (SAR) with distributed generation]. *Sb. nauchn. trudov IV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. "Nauka v sovremennom mire: aktual'nye voprosy, dostizheniya i perspektivy razvitiya"* [Collection of scientific works of the IV International Scientific and Practical Conference "Science in the modern world: current issues, achievements and development prospects"]. Anapa: NITs "Innova" Publ., 2025, pp. 23–27. (In Russian)
2. Al'-Mukhammad A. *Vozobnovlyayemye istochniki energii v Sirii* [Renewable energy sources in Syria]. *Renewable Energy*, 2001, vol. 24, pp. 365–371.
3. Ministerstvo elektroenergii Sirii. Ministry of Electricity of Syria [Ministry of Electricity of Syria. Ministry of Electricity of Syria]. Available at: www.moe.gov.sy (accessed: April 12, 2025)
4. Shevlyugin M. V., Radi M. R. Tekhniko-ekonomicheskiy analiz integratsii solnechnykh elektrostantsiy v energosistemu Tartusa (SAR) [Technical and economic analysis of solar power plants integration into the Tartus power system (SAR)]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of research results]. 2025, Iss. 1, pp. 201–210. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-201-210. (In Russian)
5. Ramadan A., Elistratov V. *Tekhniko-ekonomicheskaya otsenka setevoy solnechnoy fotoelektricheskoy stantsii v Sirii* [Technical and economic assessment of a grid-connected solar photovoltaic power plant in Syria]. *Applied Solar Energy*, 2019, vol. 55, Iss. 3, pp. 174–188. (In Russian)
6. Makhnutin A. K., Kavalero B. V. O voprosakh primeneniya gazoturbinnnykh ustanovok i parogazovykh ustanovok v energetike [On the issues of gas turbine and combined cycle plants application in power engineering]. *Vestnik PNIPU. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya* [PNRPU Bulletin. Electrical Engineering, Information Technologies, Control Systems]. 2015, Iss. 15, pp. 84–92. (In Russian)
7. Zaychenko V. M., Chernyavskiy A. A. Sravnenie kharakteristik raspredelennykh i tsentralizovannykh skhem energosnabzheniya [Comparison of characteristics of distributed and centralized power supply schemes]. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power Engineering]. 2016, Iss. 1, pp. 2–8. (In Russian)
8. Udintsev D. N., Shvedov G. V., Shonin M. E. Vybór chisla i moshchnosti generiruyushchego oborudovaniya energotsentrov v avtonomnykh sistemakh elektrosnabzheniya i v sistemakh s raspredelennoy generatsiyey [Selection of the number and capacity of generating equipment for power centers in autonomous power supply systems and in systems with distributed generation]. *Energetik* [Power Engineer]. 2020, Iss. 2, pp. 37–43. (In Russian)

9. *International Renewable Energy Agency (IRENA). Zatraty na vyrobottu elektroenergii na osnove VIE — 2023 god* [Costs of electricity generation based on RES — 2023]. Available at: <https://www.irena.org/Publications/2024/Sep/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2023> (accessed: April 12, 2025).

10. Batenin V. M., Zaychenko V. M., Leont'ev A. I., Chernyavskiy A. A. Kontseptsiya razvitiya raspredelennoy energetiki v Rossii [The concept of distributed power engineering development in Russia]. *Izvestiya RAN. Energetika* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering]. 2017, Iss. 1, pp. 3–18. (In Russian)

Received: June 05, 2025

Accepted: August 31, 2025

Author's information:

Mangal R. RADI — Postgraduate Student; manhalradi67@gmail.com

Maksim V. SHEVLYUGIN — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; mx_sh@mail.ru

УДК 621.315.2

Исследование повреждений кабельных линий постоянного тока в процессе эксплуатации на городском наземном электрическом транспорте

А. В. Агунов¹, С. К. Тураев², Р. А. Щербаков³

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

²СПб ГУП «Горэлектротранс», Российская Федерация, 196105, Санкт-Петербург, Сызранская ул., 15

³АО «Ленгипротранс», Российская Федерация, 196105, Санкт-Петербург, Московский пр., 143

Для цитирования: Агунов А. В., Тураев С. К., Щербаков Р. А. Исследование повреждений кабельных линий постоянного тока в процессе эксплуатации на городском наземном электрическом транспорте // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 3. — С. 61–75. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-61-75

Аннотация

Цель: Выполнить анализ факторов, влияющих на срок службы кабельных линий городского наземного электрического транспорта, а также существующих моделей расчета старения изоляции. **Методы:** Исследование процессов, оказывающих наиболее сильное влияние на изоляцию кабельных линий городского наземного электрического транспорта, оценка эффективности существующих математических моделей на основе анализа учитываемых факторов влияния и полученных результатов. **Результаты:** В работе представлено подробное описание контроля состояния кабельных линий городского наземного электрического транспорта на сегодняшний день, а также приведен анализ факторов, оказывающих влияние на нормальное старение изоляции кабельных линий. Выполнена оценка эффективности существующих математических моделей расчета срока службы изоляции. **Практическая значимость:** Результаты проделанной работы позволяют сделать следующий шаг к усовершенствованию математического моделирования по расчету срока службы изоляции кабельных линий, которая может быть применена в разрабатываемой методике непрерывного мониторинга и превентивном анализе аварийного состояния кабельных линий, проложенных под земляным полотном.

Ключевые слова: Городской электрический транспорт, энергохозяйство, кабельные линии, диагностика, мониторинг.

Как известно, в системах электроснабжения городского электрического транспорта не обойтись без применения кабельных линий, в том числе кабельных линий, прокладываемых под земляным полотном, что, в свою очередь, значительно усложняет процесс локализации и устранения подобных аварий, а также увеличивает срок устранения и стоимость их. В большинстве случаев причиной аварийных ситуаций на кабельных линиях является нарушение целостности их изоляции.

Важно производить проверку силовых кабелей перед запуском в эксплуатацию для обеспечения надежности их работы.

Для обеспечения надежной и безопасной эксплуатации силовых кабелей необходимо проводить их предварительную проверку и диагностику. Проверке

подлежат токоведущие жилы кабеля, обеспечивающие соединение источника электроэнергии с потребителем, и их изоляция, предотвращающая возникновение коротких замыканий. В связи с тем, что традиционные испытания повышенным напряжением [1] способны повреждать изоляционный слой и сокращать срок его службы, рекомендуется отдавать предпочтение неразрушающим методам контроля [2, 3]:

- 1) определение тока утечки;
- 2) определение сопротивления изоляции [4];
- 3) определение напряжения/тока процессов поляризации/деполяризации диэлектрика [5, 6];
- 4) Оптическая, тепловизионная и ультразвуковая дефектоскопия [7, 8];
- 5) метод рефлектометрии (анализ однородности изоляции) [9].

Для предварительной локализации повреждений изоляции кабельных линий используют методы импульсной рефлектометрии и отраженных импульсов [10], при этом для повышения точности диагностики применяют сложные формы импульсов, такие как вейвлет-импульсы [2].

Для диагностики кабельных линий наиболее перспективным и эффективным является метод высокочастотной рефлектометрии [2]. Данный метод предполагает анализ частотной зависимости входного сопротивления кабеля, что дает возможность точно обнаруживать и определять местоположение распределенных дефектов, включая дендриты, образующиеся из-за частичных разрядов. Параллельно для мониторинга температуры изоляции применяется метод оптической рефлектометрии. Он позволяет измерять температурные изменения вдоль всей кабельной линии с высокой точностью — до 1 метра по длине и до 1 °C по значению. Однако для его использования необходимо, чтобы в конструкции кабеля присутствовала оптоволоконная жила.

Рефлектометрические методы в целом обеспечивают высокоточный предварительный поиск повреждений, что помогает своевременно выявлять и устранять дефекты в кабельных линиях. Важным преимуществом этого способа диагностики является возможность его проведения без отключения потребителей от сети. На рис. 1 продемонстрирована последовательность действий при обнаружении и восстановлении нарушенного изоляционного материала кабельной линии, которая актуальна в настоящее время.

В процессе эксплуатации кабельная изоляция подвергается различным внешним и внутренним воздействиям, которые способствуют ее старению и зачастую разрушению [4, 11–13]. Среди них:

1. Механические воздействия — в процессе монтажных операций возникают локальные механические напряжения, способные нарушить целостность изоляционного слоя. Образование микротрещин создает каналы для диффузии влаги, что интенсифицирует процессы разрушения диэлектрика.

2. Термическое воздействие — повышение температуры активизирует химические процессы деструкции полимерной матрицы, включая реакции деполимеризации. Кинетика этих процессов подчиняется закону Аррениуса, демонстрируя экспоненциальную зависимость скорости деградации от температуры.

3. Гигроскопические эффекты — атмосферная влага, проникая в изоляционный материал, вызывает:

- снижение объемного сопротивления;
- изменение диэлектрической проницаемости;
- образование проводящих мостиков.

Для количественной оценки применяют коэффициент абсорбции, определяемый как отношение сопротивлений через 60 и 15 секунд после приложения напряжения.

4. Фотохимическая деструкция — УФ-излучение с длиной волны 280–400 нм индуцирует:

- разрыв σ -связей в полимерных цепях;
- образование свободных радикалов;
- отрыв боковых групп (преимущественно водородных).

Результатом является снижение молекулярной массы и ухудшение механических характеристик материала [11].

5. Химическая агрессия — воздействие реакционноспособных соединений (HNO_3 , O_2 и др.) приводит к:

- окислению полимерной матрицы;
- гидролитическому распаду;
- образованию карбонильных групп.

Особую опасность представляют кислотные среды, вызывающие каталитическую деструкцию даже при комнатной температуре.

6. Механические напряжения — превышение предельных деформаций вызывает:

- разрыв межмолекулярных связей;
- рекристаллизацию полимерной фазы;
- образование трещин Гриффитса.

Эти процессы существенно снижают электрическую прочность изоляции [11].

7. Радиационное воздействие — ионизирующее излучение индуцирует:

- образование ловушечных уровней;
- пространственную переориентацию макромолекул;
- накопление объемного заряда.

Последствия облучения проявляются в виде повышенной электропроводности и снижения пробивного напряжения [14].

Разработка эффективной системы контроля требует:

- 1) фундаментального исследования механизмов деградации изоляции под различными воздействиями;
- 2) дифференцированного подхода к оценке остаточного ресурса с учетом:
 - индивидуальных условий эксплуатации каждого кабельного участка;
 - вариабельности воздействующих факторов;
 - возможности исключения второстепенных параметров при определенных условиях.

В текущей эксплуатации СПб ГУП «Горэлектротранс» находятся два типа кабелей:

1. Кабель марки АПв2ЭПу ТС 1х800-1:
 - изоляционный материал — сшитый полиэтилен;
 - область применения: реконструкция существующих сетей, капитальный ремонт, новые строительные проекты;
 - конструктивные особенности представлены на рис. 2.
2. Кабель АСБ2л 1х800-1 с изоляцией из пропитанной бумаги приведен на рис. 3 (основная часть кабельного хозяйства, находящаяся в эксплуатации).

Для дальнейшего исследования необходимо провести анализ конструкции указанных кабелей для создания общей математической модели.

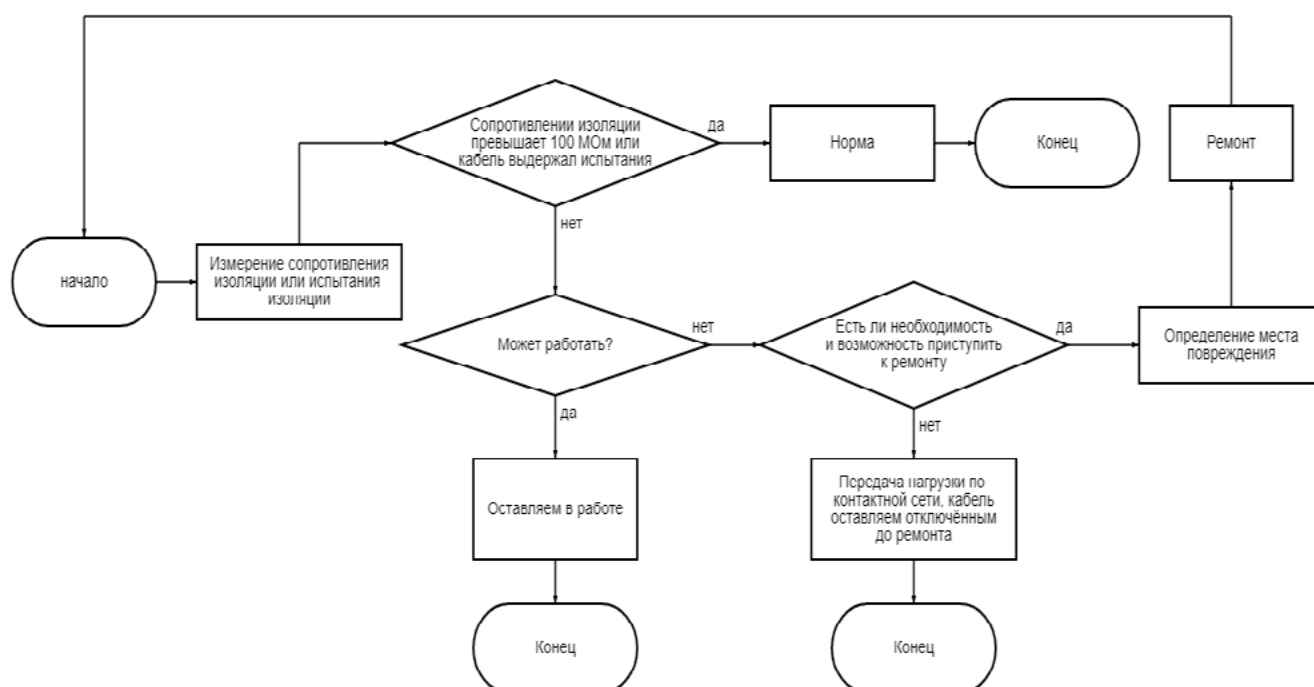


Рис. 1. Схема алгоритма обнаружения и устранения повреждений кабельной изоляции

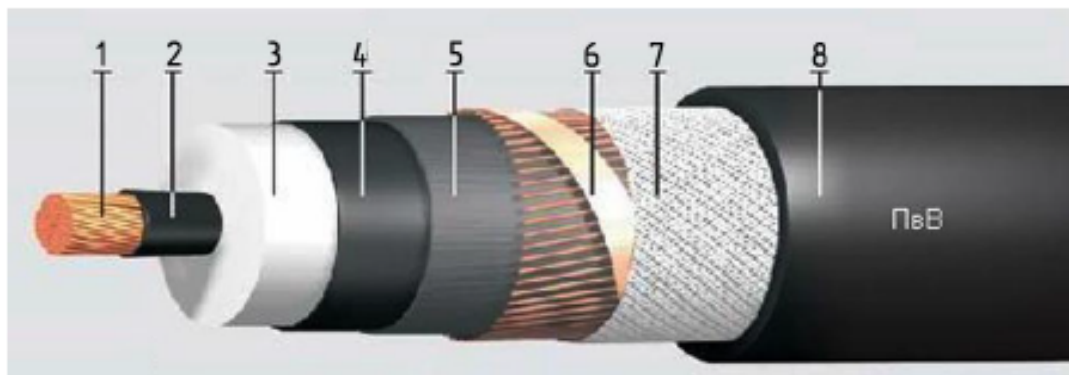


Рис. 2. Конструкция одножильного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена:
 1 — алюминиевая или медная токопроводящая жила; 2 — полупроводящий слой из сшитой полимерной композиции; 3 — изоляция из сшитого полиэтилена;
 4 — полупроводящий слой из сшитой полимерной композиции; 5 — слой из электропроводящей водоблокирующей ленты; 6 — экран из медных проволок, скрепленных медной лентой; 7 — слой из электропроводящих водоблокирующих лент; 8 — полиэтиленовая оболочка

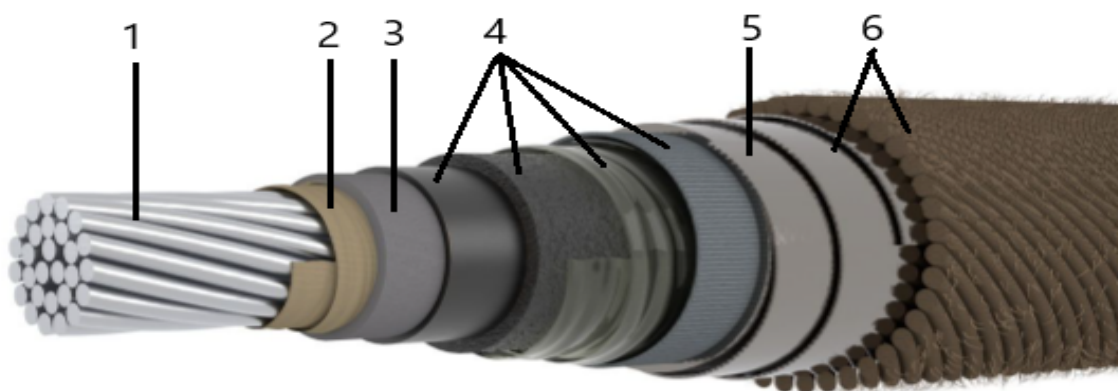


Рис. 3. Конструкция одножильного кабеля с бумажной пропитанной изоляцией:
 1 — алюминиевая токопроводящая жила; 2 — бумажная изоляция жилы, пропитанная вязким составом; 3 — герметичная свинцовая оболочка;
 4 — подушка не менее 1,5 мм (битумный состав или битум, ленты полиэтилентерефталатные, крепированная бумага или кабельная пропитанная, битумный состав или битум, ленты полиэтилентерефталатные, крепированная бумага или кабельная пропитанная, битумный состав или битум); 5 — броня из двух стальных черных или оцинкованных лент толщиной не менее 0,5 мм;
 6 — наружный покров толщиной не менее 2,0 мм (битумный состав или битум или вязкий подклеивающий состав, пропитанная кабельная пряжа или стеклянная пряжа из штапелированного волокна, битумный состав или битум или вязкий подклеивающий состав, покрытие, предохраняющее витки кабеля от слипания)

Кабели с бумажной пропитанной изоляцией со временем могут высыхать при нарушении изоляционного слоя под воздействием воздуха и тепла, что приводит к их выходу из строя. Однако в случае прокладки кабеля в земляном полотне более вероятным является попадание воды в образовавшиеся дефекты изоляции. В такой ситуации поведение обоих типов кабелей — как с изоляцией из сшитого полиэтилена, так и с бумажной пропитанной изоляцией — становится практически идентичным.

Исследование конструкции кабелей и их подземного расположения в городской инфраструктуре позволило исключить из рассмотрения следующие факторы деградации изоляции:

1. Химические факторы — данный вид воздействий не выделяется в отдельную категорию по следующим причинам:

- концентрация химически активных веществ в изоляционном материале минимальна;

- основная часть химических соединений образуется в результате термической деструкции изоляции при нагреве токоведущей жилы в рабочих режимах.

2. Радиационное воздействие — актуальность данного фактора ограничена специальными объектами инфраструктуры (атомные электростанции, исследовательские реакторы). В рамках настоящего исследования, посвященного кабельным сетям городского электротранспорта, радиационный фактор не учитывается ввиду его незначительности.

Ключевые факторы старения изоляции:

1. Термическое воздействие — обусловлено нагревом токопроводящей жилы при прохождении рабочего тока.

2. Механические повреждения возникают:

- в процессе монтажных работ;
- при проведении строительных операций вблизи трассы прокладки.

Последствия механических повреждений:

- нарушение герметичности изоляции;
- проникновение влаги в поврежденные участки с дальнейшим развитием дефекта;

- ускорение процессов деградации изоляционных материалов.

Для создания эффективной системы контроля предлагается:

1. Разработка многоуровневой системы оценки:

- первичный (экспресс-анализ);
- углубленный (лабораторные исследования);
- комплексный (с применением математического моделирования).

2. Внедрение адаптивных алгоритмов:

- автоматическая корректировка значимости параметров;
- динамическое изменение периодичности контроля;
- прогнозирование остаточного ресурса.

Система мониторинга должна учитывать:

- специфику используемых кабельных изделий;
- условия городской эксплуатации;
- экономическую целесообразность контроля различных параметров.

Особое внимание следует уделить кабелям с изоляцией из сшитого полиэтилена ввиду их широкого применения при модернизации сетей.

В современной научной литературе представлено значительное количество исследований, посвященных оценке степени деградации изоляционных материалов [15–22]. Среди существующих подходов к моделированию процессов старения особого внимания заслуживают следующие теоретические модели:

1. Термоактивационная модель Журкова (1960-е гг.)

Данная модель описывает зависимость срока службы материала от механических и температурных воздействий:

$$\tau_{\text{сл}} = \tau_0 \exp \left[\frac{U_0 - \gamma \sigma}{kT} \right], \quad (1)$$

где τ_0 , U_0 , γ — константы, зависящие от структуры материала и определяемые экспериментальным путем;

σ — растягивающее напряжение;

k — постоянная Больцмана;

T — абсолютная температура.

2. Квантово-механическая модель Крайна (1990-е гг.). Модель учитывает квантовые эффекты при разрушении изоляции:

$$\tau_{\text{сл}} \cong \frac{h}{2kT} \exp \left(\frac{\Delta G}{kT} \right) \text{csch} \left(\frac{e\delta E}{kT} \right), \quad (2)$$

где h — постоянная Планка;

k — постоянная Больцмана;

T — абсолютная температура;

ΔG — энергия активации Гиббса;

e — заряд электрона, ускоренного электрическим полем с напряженностью E на дистанции δ .

3. Комбинированная модель на основе модели старения от температуры Аррениуса и обратной степенной модели (выражение (3)):

$$\tau_{\text{сл}} = \tau_0 \exp(-BcT) \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-(n_0 - bcT)}, \quad (3)$$

где E — напряженность электрического поля;

$cT = 1/T_0 - 1/T$ — условное температурное напряжение (T — абсолютная температура);

T_0 — приблизительная контрольная температура (комнатная температура);
 n_0 — коэффициент выносливости по напряжению;
 E_0 — значение напряженности электрического поля, ниже которого влиянием электрического поля можно пренебречь;
 τ_0 — срок службы при $T = T_0$, $E = E_0$, $B = \Delta W/k$ (ΔW — энергия активации реакции термической деградации, k — постоянная Больцмана);
 b — параметр, показывающий синергизм теплового и электромагнитного взаимодействий.

4. Модель старения изоляции, предложенная Г. С. Кучинским, учитывает воздействие таких факторов, как температура и электрическое поле:

$$\tau_{\text{сл}} = AE^{-n} \exp\left(\frac{W_a}{kT}\right), \quad (4)$$

где E — напряженность электрического поля;

W_a — энергия активации;

k — постоянная Больцмана;

T — абсолютная температура;

A — константа, зависящая от структуры и свойств изоляции;

n — показатель степени, зависящий от типа изоляции.

Для объективного сравнения моделей были приняты следующие условия:

- исключена модель для тонких полимерных пленок как нерелевантная;
- параметры подобраны для срока службы 30 лет при 90 °С;
- все расчеты выполнены при идентичных начальных условиях.

Результаты сравнительного анализа (рис. 4) демонстрируют возможность параметрической настройки моделей для получения сопоставимых результатов. Это подтверждает, что различия в прогнозах обусловлены главным образом выбором коэффициентов, которые могут варьироваться в широких пределах для различных материалов.

Особое внимание следует обратить на существенную зависимость результатов моделирования от:

- 1) энергии активации процессов деградации;
- 2) коэффициентов электрической прочности;
- 3) параметров синергетического взаимодействия факторов.

Данный анализ подтверждает необходимость экспериментального определения параметров моделей для каждого конкретного типа изоляционного материала. Например, возможен набор коэффициентов, при котором зависимости совпадут, что доказывается графиком зависимости (рис. 4) при параметрах, указанных в таблице.

Однако является недостаточным исключительно расчет зависимости срока службы изоляции от температуры, поскольку напряжение на кабеле непрерывно

меняется в пределах 10 % от номинального. Также на изоляции могут возникать перенапряжения, вызванные коммутациями или грозой. В связи с этим необходимо произвести расчеты срока службы изоляции в зависимости от напряжения и температуры. Для решения этих задач был применен пакет программ MATLAB. Полученные результаты моделирования представлены на рис. 5.

Параметры моделей старения изоляции

Модель С. Н. Журкова		Модель Ж.-П. Крайна	
Характеристика	Величина	Характеристика	Величина
τ_0 [с]	10^{-3}	ε [Ф/м]	$2,213 \cdot 10^{-11}$
W [кДж/моль]	84	ΔG [Дж]	$2,5555 \cdot 10^{-19}$
χ [кДж · мм / (моль · кВ)]	0,447	T_0 [K]	293
R [кДж / (моль · K)]	$8,314 \cdot 10^{-3}$	ΔV [м ³]	$3,4 \cdot 10^{-23}$
Модель Аррениуса-ОСМ		Модель Г. С. Кучинского	
Характеристика	Величина	Характеристика	Величина
τ_0 [с]	$2 \cdot 10^5$	A	$5,3 \cdot 10^{16}$
b [K · мм/кВ]	200	W [кДж/моль]	84
n_0	16	n	3
E_0 [кВ/мм]	5	R [кДж / (моль · K)]	$8,314 \cdot 10^{-3}$
B [K]	10 103		

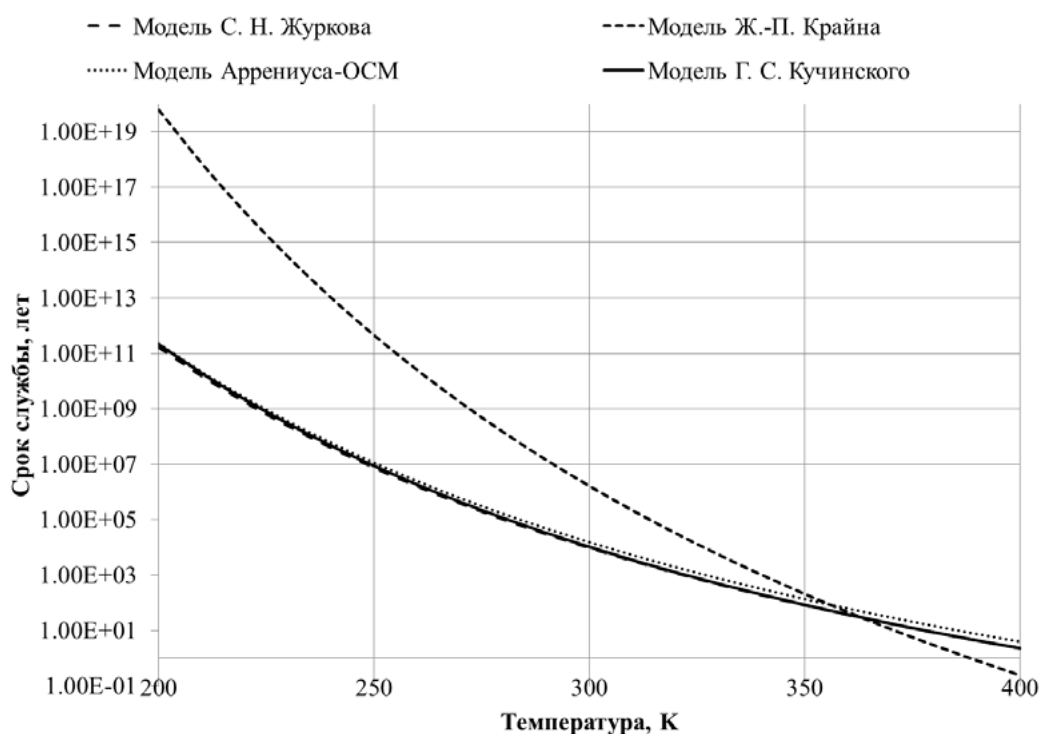


Рис. 4. Зависимости срока службы изоляции кабелей из сшитого полиэтилена от температуры при номинальной напряженности электрического поля, рассчитанные по различным моделям старения изоляции

Проведенное исследование расчетных данных позволило установить, что все анализируемые модели демонстрируют качественно одинаковую зависимость срока службы изоляционных материалов от:

- температурного воздействия;
- напряженности электрического поля.

Такая согласованность результатов полностью соответствует фундаментальным теоретическим представлениям о процессах деградации диэлектриков.

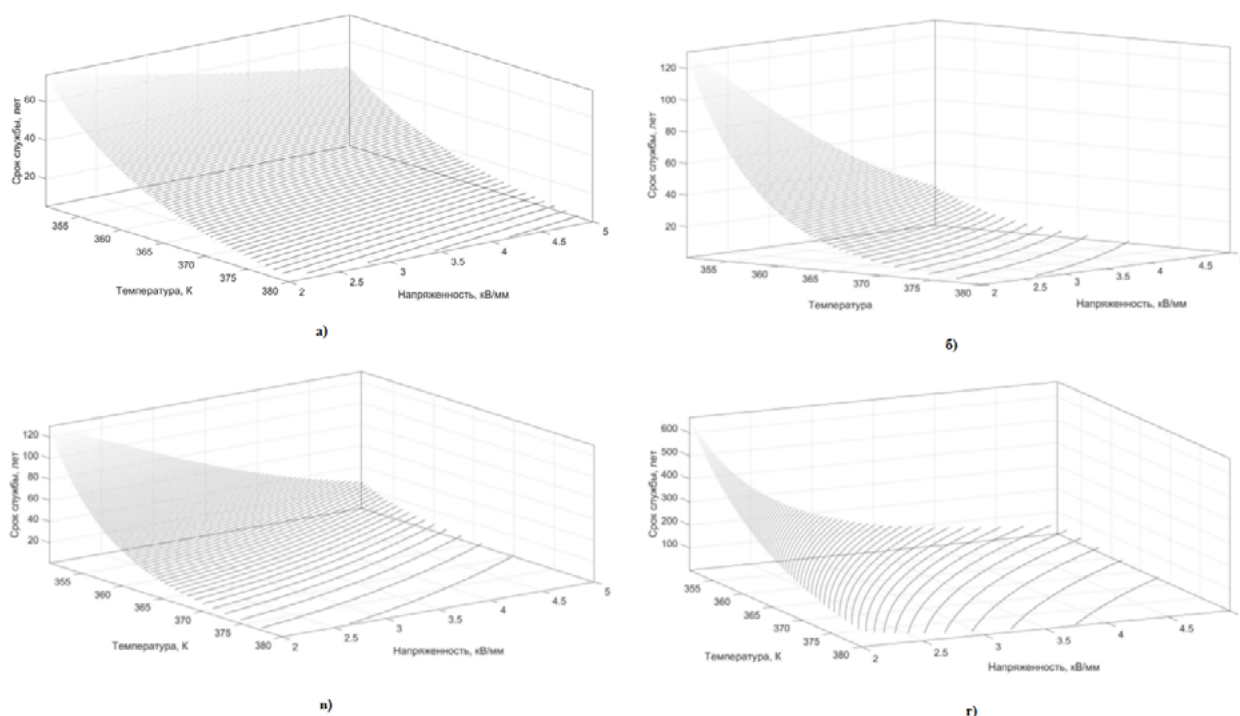


Рис. 5. Зависимость срока службы от напряженности и температуры, согласно модели:
 а — С. Н. Журкова; б — Ж.-П. Крайна; в — Аррениуса-ОСМ; г — Г. С. Кучинского

Обоснование выбора модели Г. С. Кучинского для математического моделирования:

1. Комплексный учет доминирующих факторов деградации:

- термическая составляющая (экспоненциальный член уравнения) адекватно описывает: процессы термоокислительной деструкции, тепловое старение материала;
- электрическая составляющая (степенной член) учитывает: воздействие влаги, поляризованной электрическим полем, электромеханические напряжения, джоулевы потери.

2. Оптимальное соотношение точности и сложности:

- сохраняет физическую содержательность ключевых параметров;
- не содержит избыточных коэффициентов, затрудняющих идентификацию;

- позволяет проводить параметрические исследования с ясной физической интерпретацией.

3. Верифицируемость модели:

- все коэффициенты (A , n , W_a) имеют четкий физический смысл;
- допускают экспериментальное определение стандартными методами;
- позволяют проводить сопоставление с референсными данными.

4. Простота математической формы обеспечивает быструю сходимость численных расчетов, удобство параметрической оптимизации, наглядность анализа результатов.

Предлагаемая модель особенно эффективна для анализа кабельной изоляции электротранспорта, где критически важны:

- учет синергетического эффекта температуры и электрического поля;
- возможность прогнозирования остаточного ресурса;
- простота адаптации к конкретным эксплуатационным условиям.

Модель Кучинского, дополненная экспериментальными данными и уточненными коэффициентами, является оптимальным инструментом для оценки состояния изоляции кабелей. Ее применение повысит надежность работы городских кабельных сетей и снизит риск аварийных ситуаций.

Исследование структуры кабеля, рассматриваемого в настоящей работе, позволило сформировать вывод о том, что при вычислениях остаточного ресурса изоляции кабеля достаточно принимать во внимание влияния электрического поля и температуры на изоляционный материал.

Мы тщательно изучили строение кабеля и пришли к выводу, что при расчете оставшегося срока службы его изоляции нужно учитывать всего два основных фактора: воздействие электрического поля и температуры. Это значительно упрощает задачу, так как другие факторы в нашем случае играют меньшую роль.

В перспективе мы сможем точно предсказывать, когда кабель потребует замены, что поможет избежать аварий и сэкономить средства. Следующий шаг — испытания нашей модели на реальных кабельных линиях. Далее направление исследований должно быть сосредоточено на создании системы непрерывного мониторинга и предиктивного анализа состояния кабельных линий городского наземного электрического транспорта. Система будет базироваться на существующих программно-аппаратных комплексах, обрабатывающих данные с рефлектограмм, датчиков температуры, напряжения и разности тока в «+» и «-» кабелях. На основе предложенной математической модели система будет определять остаточный срок службы исследуемых кабельных линий.

Результаты таких исследований приведут к принципиальному изменению методики контроля состояния кабельных линий (рис. 1) и, как следствие, к автоматизации данного процесса

Список источников

1. Правила устройства электроустановок / НЦ ЭНАС. — М., 2000. — 552 с.
2. Пономарев Н. В. Анализ методов диагностики состояния силовых высоковольтных кабельных линий / Н. В. Пономарев // Вестник КузГТУ. — 2012. — № 5(93). — С. 68–71.
3. Гудков В. В. Особенности методик и средств испытаний кабелей с СПЭ-изоляцией / В. В. Гудков // Энергобезопасность и энергосбережение. — 2009. — № 6. — С. 9–11.
4. Койков С. Н. Электрическое старение твердых диэлектриков / С. Н. Койков, А. Н. Цикин. — Л.: Энергия, 1968. — 186 с.
5. Степанов В. М. Определение электрического сопротивления изоляции и емкости кабелей / В. М. Степанов, С. В. Ершов // Известия ТулГУ. Технические науки. — 2010. — № 3–5. — С. 62–64.
6. Соломенцев К. Ю. Измеритель тока для исследования токов абсорбции в диэлектриках / К. Ю. Соломенцев и др. // Современные энергетические системы и комплексы и управление ими: материалы 13-ой Международной научно-практической конференции. — 2015. — С. 97–99.
7. Власов А. Б. Факторный анализ диагностической модели тепловизионного контроля электрической машины / А. Б. Власов, Е. А. Мухин, Б. Д. Царев // Вестник МГТУ. — 2013. — № 1. — С. 46–51.
8. Уразов Д. Ю. О преимуществах тепловизионного метода анализа работы электрооборудования / Д. Ю. Уразов // Вестник ВГУИТ. — 2012. — № 3. — С. 51–53.
9. Сотников В. В. Математическое моделирование системы локализации и типизации повреждений работающей силовой сети / В. В. Сотников // Вестник СГТУ. — 2011. — № 4(62). — С. 165–169.
10. Аникушин Д. Г. Анализ методов определения мест повреждения кабельных линий на основе неразрушающей диагностики / Д. Г. Аникушин // Известия ТулГУ. Технические науки. — 2012. — Т. 3. — № 12. — С. 78–84.
11. Конкин А. А. Полиолефиновые волокна / А. А. Конкин, М. П. Зверев. — 3-е изд. — Л.: Химия, 1966. — 280 с.
12. Тагер А. А. Физико-химия полимеров / А. А. Тагер; под ред. А. А. Аскадского. — М.: Научный мир, 2007. — 576 с.
13. Whitman L. C. Calculation of life characteristics of insulation / L. C. Whitman, P. Doigan // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part I: Communication and Electronics. — 1954. — Vol. 73. — Iss. 3. — Pp. 193–198.
14. Жанчипов Б. Д. Радиационная электризация диэлектриков / Б. Д. Жанчипов, К. А. Истомин // Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее: научные труды III Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых. — Томск: Изд-во ТПУ, 2014. — Т. 1. — С. 83–90.
15. Luo P. Thermal and mechanical properties analysis for EHV XLPE cables with different operating years / P. Luo et al. // 2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. — Vol. 3. — Pp. 47–51.
16. Shimada A. Degradation distribution in insulation materials of cables by accelerated thermal and radiation ageing / A. Shimada et al. // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. — 2013. — Vol. 20. — Iss. 6. — Pp. 2107–2116.
17. Aras F. Aging of 154 kV underground power cable insulation under combined thermal and electrical stresses / F. Aras et al. // IEEE Electr. Insul. Mag. — 2007. — Vol. 23. — Iss. 5. — Pp. 25–33.
18. Kim C. Investigation of dielectric behavior of thermally aged XLPE cable in the high-frequency range / C. Kim et al. // Polym. Test. — 2006. — Vol. 25. — Iss. 4. — Pp. 553–561.

19. Langlois V. Thermooxidative aging of crosslinked linear polyethylene: Stabilizer consumption and lifetime prediction / V. Langlois et al. // Polym. Degrad. Stab. — 1993. — Vol. 40. — Iss. 3. — Pp. 399–409.
20. Gulmine J. V. Correlations between structure and accelerated artificial ageing of XLPE / J. V. Gulmine, L. Akcelrud // Eur. Polym. J. — 2006. — Vol. 42. — Iss. 3. — Pp. 553–562.
21. Celina M. Accelerated aging and lifetime prediction: Review of non-Arrhenius behaviour due to two competing processes / M. Celina, K. T. Gillen, R. A. Assink // Polym. Degrad. Stab. — 2005. — Vol. 90. — Iss. 3. — Pp. 395–404.
22. Sugimoto M. Product analysis for polyethylene degradation by radiation and thermal ageing / M. Sugimoto et al. // Radiat. Phys. Chem. Elsevier. — 2013. — Vol. 82. — Iss. 1. — Pp. 69–73.

Дата поступления: 24.06.2025

Решение о публикации: 20.07.2025

Контактная информация:

АГУНОВ Александр Викторович — д-р техн. наук, проф.; alexagunov@mail.ru

ТУРАЕВ Семен Константинович — начальник управления капитального строительства и ремонта; skturaev@mail.ru

ЩЕРБАКОВ Роман Александрович — инженер 3-й категории; mrz@yandex.ru

Assessment of DC Cable Line Damage During Urban Electric Transport Operation

A. V. Agunov¹, S. K. Turaev², R. A. Shcherbakov³

¹Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²SUE "Gorelectrotrans", 15, Syzranskaya str., Saint Petersburg, 196105, Russian Federation

³JSC Lengiprotrans, 143, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 196105, Russian Federation

For citation: Agunov A. V., Turaev S. K., Shcherbakov R. A. Assessment of DC Cable Line Damage During Urban Electric Transport Operation. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 3, pp. 61–75. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-61-75

Summary

Purpose: To analyze the factors influencing the service life of urban electric transport cables, as well as the existing calculation models of insulation aging. **Methods:** The investigation will examine the factors that most influence the insulation of cable lines in urban electric transport. The efficiency of existing mathematical models will be evaluated based on the analysis of these factors and the results obtained. **Results:** The paper presents a comprehensive monitoring of cable lines of urban electric transport to date, as well as an analysis of the factors that influence the normal aging of cable line insulation. The efficiency of the existing mathematical models for calculating the cable insulation service life has been evaluated. **Practical significance:** The results of the investigation carried out have enabled a further step to be taken in the improvement of mathematical modelling for the calculation of cable line insulation service life. This can be applied in the method of ongoing monitoring and analysis of the condition of cable lines laid under the earth formation, in order to prevent potential emergencies.

Keywords: Urban electric transport, energy management, cable lines, diagnostics, monitoring.

References

1. *Pravila ustroystva elektroustanovok* [Rules for the device of electrical installations]. Moscow: NC ENAS Publ., 2000, 552 p. (In Russian)
2. Ponomarev N. V. Analiz metodov diagnostiki sostoyaniya silovykh vysokovol'tnykh kabel'nykh liniy [Analysis of methods for diagnosing the condition of high-voltage power cable lines]. *Vestnik KuzGTU* [Bulletin of KuzSTU]. 2012, Iss. 5(93), pp. 68–71. (In Russian)
3. Gudkov V. V. Osobennosti metodik i sredstv ispytaniy kabeley s SPE-izolyatsiey [Features of methods and means of testing cables with XLPE insulation]. *Energobezopasnost' i energosberezheniye* [Energy safety and energy saving]. 2009, Iss. 6, pp. 9–11. (In Russian)
4. Koykov S. N., Tsikin A. N. *Elektricheskoye starenie tverdykh dielektrikov* [Electrical aging of solid dielectrics]. Leningrad: Energiya Publ., 1968, 186 p. (In Russian)
5. Stepanov V. M., Ershov S. V. Opredeleniye elektricheskogo soprotivleniya izolyatsii i emkosti kabeley [Determination of electrical insulation resistance and capacitance of cables]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki* [Proceedings of TulSU. Technical sciences]. 2010, Iss. 3–5, pp. 62–64. (In Russian)
6. Solomentsev K. Yu. et al. Izmeritel' toka dlya issledovaniya tokov absorbtzii v dielektrikakh [Current meter for studying absorption currents in dielectrics]. *Sovremennyye energeticheskiye sistemy i komplekсы i upravleniye imi: materialy 13-oy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern energy systems and complexes and their management: materials of the 13th International Scientific and Practical Conference]. 2015, pp. 97–99. (In Russian).
7. Vlasov A. B., Mukhin E. A., Tsarev B. D. Faktornyy analiz diagnosticheskoy modeli teplovizionnogo kontrolya elektricheskoy mashiny [Factor analysis of the diagnostic model of thermal imaging control of an electric machine]. *Vestnik MGTU* [Bulletin of MSTU]. 2013, Iss. 1, pp. 46–51. (In Russian).
8. Urazov D. Yu. O preimushchestvakh teplovizionnogo metoda analiza raboty elektrooborudovaniya [On the advantages of the thermal imaging method for analyzing the operation of electrical equipment]. *Vestnik VGUIT* [Bulletin of VSUET]. 2012, Iss. 3, pp. 51–53. (In Russian)
9. Sotnikov V. V. Matematicheskoye modelirovaniye sistemy lokalizatsii i tipizatsii povrezhdeniy rabotayushchey silovoy seti [Mathematical modeling of the system for localization and typification of damage to an operating power network]. *Vestnik SGTU* [Bulletin of SSTU]. 2011, Iss. 4(62), pp. 165–169. (In Russian)
10. Anikushin D. G. Analiz metodov opredeleniya mest povrezhdeniya kabel'nykh liniy na osnove nerazrushayushchey diagnostiki [Analysis of methods for determining the location of cable line damage based on non-destructive diagnostics]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki* [Proceedings of TulSU. Technical sciences]. 2012, vol. 3, Iss. 12, pp. 78–84. (In Russian)
11. Konkin A. A., Zverev M. P. *Poliolefinovyye volokna* [Polyolefin fibers]. Leningrad: Khimiya Publ., 1966, 280 p. (In Russian)
12. Tager A. A. *Fiziko-khimiya polimerov; pod red. A. A. Askadskogo* [Physical chemistry of polymers; ed. by A. A. Askadskiy]. Moscow: Nauchnyy mir Publ., 2007, 576 p. (In Russian)

13. Whitman L. C., Doigan P. Calculation of life characteristics of insulation. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part I: Communication and Electronics. 1954, vol. 73, Iss. 3, pp. 193–198.
14. Zhanchipov B. D., Istomin K. A. Radiatsionnaya elektrizatsiya dielektrikov [Radiation electrification of dielectrics]. *Resursoeffektivnyye sistemy v upravlenii i kontrole: vzglyad v budushcheye: nauchnyye trudy III Mezhdunarodnoy konferentsii* [Resource-efficient systems in management and control: a look into the future: scientific works of the III International Conference]. Tomsk: TPU Publ., 2014, vol. 1, pp. 83–90. (In Russian)
15. Luo P. et al. Thermal and mechanical properties analysis for EHV XLPE cables with different operating years. 2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. 2013, vol. 3, pp. 47–51.
16. Shimada A. et al. Degradation distribution in insulation materials of cables by accelerated thermal and radiation ageing. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2013, vol. 20, Iss. 6, pp. 2107–2116.
17. Aras F. et al. Aging of 154 kV underground power cable insulation under combined thermal and electrical stresses. IEEE Electr. Insul. Mag. 2007, vol. 23, Iss. 5, pp. 25–33.
18. Kim C. et al. Investigation of dielectric behavior of thermally aged XLPE cable in the high-frequency range. Polym. Test. 2006, vol. 25, Iss. 4, pp. 553–561.
19. Langlois V. et al. Thermooxidative aging of crosslinked linear polyethylene: Stabilizer consumption and lifetime prediction. Polym. Degrad. Stab. 1993, vol. 40, Iss. 3, pp. 399–409.
20. Gulmine J. V., Akcelrud L. Correlations between structure and accelerated artificial ageing of XLPE. Eur. Polym. J. 2006, vol. 42, Iss. 3, pp. 553–562.
21. Celina M., Gillen K. T., Assink R. A. Accelerated aging and lifetime prediction: Review of non-Arrhenius behaviour due to two competing processes. Polym. Degrad. Stab. 2005, vol. 90, Iss. 3, pp. 395–404.
22. Sugimoto M. et al. Product analysis for polyethylene degradation by radiation and thermal ageing. Radiat. Phys. Chem. Elsevier. 2013, vol. 82, Iss. 1, pp. 69–73.

Received: June 24, 2025

Accepted: July 20, 2025

Author's information:

Alexander V. AGUNOV — PhD in Engineering, Professor; alexagunov@mail.ru

Semyon K. TURAEV — Head of the Capital Construction and Repair Department; skturaev@mail.ru

Roman A. SHCHERBAKOV — Engineer 3rd category; mrz@yandex.ru

УДК 625.1

Проектирование высокоскоростных железнодорожных магистралей в России на базе международного стандарта колеи 1435 мм

Е. Г. Рейн, В. С. Шварцфельд

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Рейн Е. Г., Шварцфельд В. С. Проектирование высокоскоростных железнодорожных магистралей в России на базе международного стандарта колеи 1435 мм // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 3. — С. 76–90. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-76-90

Аннотация

Цель: Исследовать вопрос интеграции международного опыта в российскую практику проектирования и строительства российских высокоскоростных железных дорог (ВСЖМ). **Методы:** Анализ зарубежной, отечественной литературы и открытых источников по исследуемой теме. **Результаты:** Определена тенденция заимствования и адаптации к местным условиям зарубежных технологий для создания новых сетей высокоскоростных железных дорог. **Практическая значимость:** Структурированный анализ, проработка и усовершенствование международного опыта позволит создать современную и технологичную высокоскоростную железнодорожную сеть в России.

Ключевые слова: Высокоскоростная железнодорожная магистраль (ВСЖМ), проектирование ВСЖМ, международный стандарт, интеграция международного опыта, международный стандарт колеи 1435 мм, высокоскоростной подвижной состав.

Введение

Создание высокоскоростной железнодорожной магистрали, а тем более полноценно развитых сетей, реализующих высокоскоростное движение, требует вложений огромных денежных, временных и интеллектуальных ресурсов. В современных реалиях высокоскоростные железнодорожные сети в мире создаются с использованием как собственных, так и зарубежных технологий и норм, что отражает уникальные подходы и опыт каждой страны.

Япония: пионер высокоскоростного железнодорожного движения

Япония стала первой страной, внедрившей технологии высокоскоростного железнодорожного движения на территории своей страны. Такой сетью стала общеизвестная «Синкансэн», запущенная в 1964 году. Несмотря на эксплуатируемую в стране узкоколейную железную дорогу, для первых ВСМ японцы прибегли к стандарту 1435 мм: технически обоснованная, стабильная и оптимальная ширина колеи, обеспечивающая устойчивость пути и безопасность движения, позволившая также увеличить габарит подвижного состава,

что положительно сказалось на комфорте пассажиров [1, 2]. Первые высокоскоростные японские поезда развивали скорость порядка 210 км/ч, а общий успех страны Восходящего солнца стал эталоном и вдохновил другие страны на создание собственных ВСЖМ.

Европа: интеграция и стандартизация сетей

Под влиянием японской сети «Синкансэн» в 1960-х годах началась эпоха европейских технологий в проектировании и строительстве ВСЖМ, тогда и была создана французская высокоскоростная железнодорожная система TGV, однако прямого заимствования японских технологий при ее разработке не было [3].

Следом за Францией к высокоскоростному железнодорожному рельсовому сообществу присоединились и другие страны Европейского союза: Германия (1991 г., ICE) и Испания (1992 г., AVE) как общеизвестные крупные центры развития высокоскоростного движения, базировавшиеся на французском опыте с добавлением собственных усовершенствованных технологических решений [4].

В Европе также наблюдается тенденция эксплуатации ВСЖМ на стандарте колеи 1435 мм, несмотря, например, на традиционно широкую иберийскую колею 1668 мм, которая используется на большинстве сетей испанских железных дорог. Единство в применяемой колее позволяет обеспечить совместимость с соседними европейскими высокоскоростными сетями и обеспечивает бесшовное следование поездов с заданными скоростями движения.

Южная Корея: стремительное преследование современных тенденций высоких скоростей

Южная Корея, объективно опоздавшая в железнодорожной отрасли, вошла в глобальную гонку по увеличению скоростей на железных дорогах в 1992 году, создав собственную высокоскоростную сеть KTX на базе французских технологий TGV [5]. Первая линия была запущена в 2004 году [6].

Несмотря на резкий скачок в технологиях, на сегодняшний день Южная Корея может похвастаться стабильными наработками в рассматриваемом вопросе (например, поезда KTX-Cheongryong, HEMU-430X; безбалластная конструкция верхнего строения пути — КСТ-II и т. д.), а также налаживанием экспорта собственных проектных решений для таких стран, как Эфиопия, Марокко и Узбекистан [7, 8]. Так, в начале 2025 года стартовала работа над технико-экономическим обоснованием проекта новой высокоскоростной железной дороги «Ташкент — Самарканд» для движения высокоскоростных поездов со скоростью 300 км/ч с участием, в том числе и финансовым, южнокорейских специалистов [9].

Китай: масштабное развитие с опорой на зарубежные технологии

Масштабное строительство сети ВСЖМ в Китае началось в начале 2000-х годов с активным использованием технологий и лицензий от зарубежных производителей (Alstom, Siemens, Shinkansen, Bombardier и др.) — и на их базе в Китае также разработаны собственные поезда (CR400AF “Fuxing”, CR450), конструкция ВСП — CRTS-III и т. д. [10].

На сегодняшний день Китай занимает лидирующую позицию по протяженности сетей высокоскоростного железнодорожного сообщения. Так, в 2024 году длина китайских ВСЖМ достигла 48 000 км [11]. Однако железнодорожная политика высоких скоростей Китая планирует увеличение сетей ВСЖМ до 60 тыс. км к 2030 году с повышением скоростей движения до 450 км/ч [12].

Россия и ее перспективы в реализации высокоскоростных железнодорожных проектов

На сегодняшний день, в соответствии со «Стратегией развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030» [13], суммарная протяженность планируемых к строительству ВСЖМ в России составляет 4671 км, а также планируется реализация таких скоростей движения, которые ранее не эксплуатировались и не тестировались на сетях и полигонах нашей страны. Очевидно и отсутствие соответствующей инфраструктуры, технического и нормативного обеспечения для проектирования, строительства и эксплуатации высокоскоростных железнодорожных магистралей.

Разработка собственных технологий требует больших финансовых и временных затрат. Положение российских ВСЖМ осложняется задачей по созданию нормативной документации и всей инфраструктуры в целом на базе отечественной ширины колеи 1520 мм. Как отмечено ранее, оптимальным решением данной проблемы является переход на международный стандарт колеи 1435 мм. Прямая экономическая выгода отображена в более ранних работах авторов [14, 15].

Одним из острых вопросов, стоящих перед российскими инженерами, является создание высокоскоростного подвижного состава. Известно, что для ВСЖМ «Москва — Санкт-Петербург» планируется внедрение нового поезда «Белый крекет» [16]. Однако в силу значительных габаритов подвижного состава увеличивается и масса состава. Это сказывается на повышении осевой нагрузки, которая, в свою очередь, влечет снижение аэродинамических характеристик отечественного подвижного состава. Кроме того, возникает риск недостижения заданных скоростей движения. Мировая практика отражает тенденцию к снижению осевой нагрузки за счет снижения массы кузова, массы тележек и тяговых двигателей (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Анализ технических характеристик подвижных составов, эксплуатируемых на ВСЖМ мира и являющихся собственными разработками каждой из представленных стран [17–31]

Страна	Название подвижного состава	Год начала эксплуатации	Габариты, высота/ширина (мм/мм)	Максимальная скорость, км/ч			Масса поезда, Q_n (т)	Длина локомотива/вагонов, L_n (м)	Осевая нагрузка, q_o (тс/ось)
				Эксплуатационная	Конструктивная	Экспериментальная			
Франция	TGV Reseau	1993	— / 2810, 2904	320	320	—	383,00	—	17,00
	TGV Duplex	1995	4303/2896			—	380,00	—	
	TGV POS	2006	4100, 3480/2814, 2904			574,80	390,00	22,15/21,845/18,70	
	TGV Euroduplex	2011	4320/2904			350,00	442,00	22,15/21,845/18,70	
Япония	N700 Series (N700, N700A)	2007	3600/3360	300	330	332	715,00	27,35/25,00	11,20
	E5 series	2011	3650/3350	320	320	—	453,50	26,50/25,00	13,10
	E6 series	2013	3650/2945	320	320	—	306,50	23,075/20,50	13,10
	N700S	2020	3600/3360	300	300	363	—	27,35/25,00	11,10
	ALFA-X	2022	3700/3350	—	400	400	488,00	26,25/24,50	12,40
	Renfe Class 100 (S-100, на базе TGV-A)	1992	4280/2900	300	—	—	392,60	22,13/21,845	17,20
Испания	Renfe Class 102/112 (S-102/112, Talgo 350)	2005	3360/2940	300	350	365	332,00	— / 13,14	17,00
	Renfe Class 103 (на базе ICE-3)	2007	3890/2950	310	350	403,70	425,00	25,70/24,20	16,00
	ICE 1	1991	3840/3020	250	280	310	849,00	20,56/ —	19,50
Германия	ICE 2	1997	3840/3070	280	300	—	412,00	20,56/ —	17,00
	ICE 3 (Velaro)	2000	3890/2950	300	330	368	409,00	25,835/24,775	16,00
	ICE 4	2017	4111/2852	250	265	—	470,00	29,106/28,75	16,00
Китай	Fuxing (CR400AF)	2016	4050/3360	350	400	420	—	27,525/25,650	17,00
	CR450	2025	4050/3360	400	450	453	460,00	28,55/25,00	14,50
	KTX-I	2003	4100/2904	300	330	—	701,10	22,60/18,70	17,00
Южная Корея	KTX-Sancheon	2008	4100, 3720/2970	305	330	—	403,00	22,70/18,70	17,00
	EMU-260 (KTX-Jeum)	2016	4000/3150	260	286	—	318,00	26,25/23,50	15,00
	EMU-320 (KTX-cheonglyong)	2024	4000/3150	300	320	352	425,00	26,25/25,50	15,00
Россия	HEMU-430X	2012–2015	3500/3100	370	430	421,40	308,00	23,50	13,00
	Белый кречет	2028	4290/3340	360	400	—	—	26,70/24,175	17,65

Из табл. 1 видно, что наибольшей осевой нагрузкой обладает российский подвижной состав «Белый кречет» (17,65 тс/ось), тогда как японцы не выходят за предельные значения в 13,00 тс/ось для своих сетей. Такие цифры диктуют и современные южнокорейские исследования: цель проекта высокоскоростной железной дороги следующего поколения в Корее — достижение максимальной скорости движения 430 км/ч, а также снижение проектной нагрузки на ось разработанного подвижного состава с распределенной мощностью до 13,00 тс/ось, что ожидаемо вызовет большой эффект с точки зрения расходов на обслуживание путей [6].

Очевидная экономия наблюдается и в вопросе денежных затрат на создание собственного подвижного состава. В табл. 2 представлена информация по стоимости поездов зарубежной разработки, эксплуатируемых на сетях российских железных дорог.

ТАБЛИЦА 2. Анализ стоимости разработки отечественного подвижного состава и приобретения зарубежных поездов для российских железных дорог [32–36]

Название подвижного состава	Год начала эксплуатации	Габариты, высота/ширина (мм/мм)	Максимальная скорость, км/ч			Осевая нагрузка, q_o (тс/ось)	Стоимость поезда из 8 вагонов на 22.04.2025, млн руб.	Стоимость вагона на 22.04.2025, млн руб.
			Эксплуатационная	Конструкционная	Экспериментальная			
Сапсан (Velaro RUS)	2009	4400/3265	250	300	—	17,00	3 812,80	476,60
Allegro	2009	4270/3200	200	220	—	17,66	4 481,55	560,19
ЭП20 «Олимп»	2011	5100/3100	180	200	—	21,50	4 605,84	575,73
Ласточка	2011	4850/3480	140	160	—	20,00	5 752,27	719,03
Стриж	2014	— /2941	150	200	—	21,00	973,56	121,70
Белый кречет	2028	4290/3340	360	400	—	17,65	6 620,54	827,57

В соответствии с табл. 2 «Белый кречет» обойдется в 1,74 раза дороже немецкого «Сапсана». Стоит отметить, что в табл. 2 для отечественного подвижного состава не отражены затраты на строительство заводов по его производству, что влечет за собой несколько кратное удорожание проекта.

Также перед вводом нового высокоскоростного поезда в эксплуатацию важным мероприятием является его прогон по полигону на дистанции нескольких сотен тысяч километров. Обычно длина полигона, которая составляет не менее 100 км, обусловлена необходимостью достижения установленных скоростей движения. Полигон устроен с учетом различных уклонов местности и криволинейных участков пути. На данный момент в России нет полигонов, которые соответствовали бы подобным стандартам безопасности, что также откладывает момент ввода и реализации проекта в целом.

Международный опыт обмена и взаимоувязка технологий ВСЖМ

В поддержку выдвигаемого для рассмотрения предложения по интеграции международных стандартов в российскую практику проектирования и строительства ВСЖМ обратимся к реализованным или планируемым к реализации проектам по международному обмену технологиями (табл. 3).

ТАБЛИЦА 3. Анализ международного опыта обмена зарубежными технологиями проектирования, строительства и эксплуатации ВСЖМ [37–46]

Страны с действующими ВСЖМ	Год ввода ВСЖМ в эксплуатацию	Линия/сеть ВСЖМ	Используемые технологии
Япония	1964	Токайдо (Синкансэн)	Отечественные (Shinkansen)
Франция	1981	Париж — Лион	Отечественные (TGV, Alstom)
Италия	1984	Рим — Флоренция	Французские (позже — немецкие) с отечественными доработками
Германия	1991	Ганновер — Вюрцбург, Мангейм — Штутгарт	Французские с отечественными доработками (ICE, Siemens)
Испания	1992	Мадрид — Барселона	Французские с отечественными доработками (AVE, Talgo)
Южная Корея	2004	Кенбу	Французские с отечественными доработками (KTX, SRT)
Китай	2008	Пекин — Тяньцзинь	Французские, немецкие и японские с отечественными доработками (China Railway Engineering Corporation)
Узбекистан	2015–2016	Ташкент — Самарканд	Японские и южнокорейские
Саудовская Аравия	2018	Аль-Харамейн	Китайские и испанские
Индонезия	2023	Джакарта — Бандунг	Китайские
Страны, планирующие строительство ВСЖМ	Год ввода ВСЖМ в эксплуатацию	Линия/сеть ВСЖМ	Используемые технологии
Россия	2028	Москва — Санкт-Петербург	Отечественные
Индия	2026	Мумбаи — Ахмедабад	Японские и китайские технологии, включая проекты с участием Франции и Испании
Иран	2025	Тагеран — Исфахан	Китайские
Южная Африка	2025	Йоханнесбург — Дурбан	Французские
Вьетнам	2027–2035	Ханой — Хошимин	Японские и южнокорейские
Канада	2025–2030	Квебек — Торонто	Европейские и японские
США	—	Сан-Франциско — Лос-Анджелес	Европейские (TGV, ICE) и японские

Помимо данных, представленных в табл. 3, известно о следующих международных проектах по объединению высокоскоростных железнодорожных сетей в одну общую трансконтинентальную паутину с унификацией норм и требований, предъявляемых к инфраструктуре ВСЖМ:

- ВСЖМ «Один пояс — один путь» — масштабная транспортная инфраструктура, связывающая Китай с Евразией, Ближним Востоком, Африкой и Европой и объединяющая более 150 стран [47].

- ВСЖМ «Евразия» — грузопассажирская высокоскоростная железнодорожная магистраль протяженностью 9477 км (Пекин — Москва — Берлин), максимальная скорость 350 км/ч [48].

- Европейская объединенная сеть высокоскоростных линий, включающая Францию, Германию, Испанию, Италию, Бельгию, Нидерланды, Великобританию и другие страны — международные маршруты Eurostar и Thalys [49]. Также планируются новые маршруты между Германией и Италией [50].

- Rail Baltica — высокоскоростная железная дорога, соединяющая три страны Балтии: Эстонию, Латвию и Литву, протяженностью 870 км, с выходом в Польшу и переходом на международный стандарт колеи 1435 мм [51].

Таким образом, во всех перечисленных странах для строительства ВСЖМ используются зарубежные технологии с обязательным трансфером знаний и адаптацией под национальные условия. Основными поставщиками технологий являются европейские компании, японские, китайские и южнокорейские производители, а также международные инженерные фирмы.

Выводы

В заключение следует отметить, что, кроме Японии и Франции, которые разработали ВСЖМ на базе собственных технологий, большинство стран строят свои высокоскоростные железнодорожные сети, используя зарубежный опыт и технологии с обязательной локализацией и передачей знаний, что позволяет им создавать конкурентоспособные национальные системы высокоскоростных железных дорог.

Проектирование и строительство высокоскоростных железнодорожных магистралей ведется на базе международного стандарта колеи 1435 мм, что подтверждается широкой географией распространения этого норматива, тогда как в России стремятся к разработке отечественного подвижного состава и технологий проектирования и строительства, ориентированных на ширину колеи 1520 мм.

В связи с тем, что в мире уже разработаны и успешно продаются технологии по созданию высокоскоростных железных дорог и подвижного состава, переход на стандарт колеи 1435 мм в России на выделенных высокоскоростных магистральных будет существенно дешевле. Это касается приобретения, адаптации и дальнейшей эксплуатации по сравнению с созданием отечественных технологий с «чистого листа».

Список источников

1. Киселев И. П. Высокоскоростной железнодорожный транспорт. Общий курс: учебное пособие для студентов вузов железнодорожного транспорта в 2 томах / И. П. Киселев, Л. С. Блажко, М. Я. Брынъ и др.; под ред. И. П. Киселева; допущено Федеральным агентством железнодорожного транспорта. Т. 1. — 2-е издание, переработанное и дополненное. — М.: Федеральное государственное бюджетное учреждение дополнительного профессионального образования «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2020. — 428 с.
2. Киселев И. П. Краткий обзор истории высокоскоростных поездов в Японии. Часть 1 / И. П. Киселев // Железные дороги мира. — 2005. — № 7. — С. 1.
3. TGV. История создания. — URL: https://pikabu.ru/story/tgv_istoriya_sozdaniya_6779069 (дата обращения: 01.02.2025).
4. Родченко В. А. Высокоскоростное железнодорожное движение. Мировой опыт и перспективы в России: учебное пособие / В. А. Родченко, Д. С. Зандарашвили. — М.: МГУПС (МИИТ), 2015. — 116 с.
5. Рейн Е. Г. Из истории железных дорог Кореи / Е. Г. Рейн, П. В. Бобарыкин // Неделя науки — 2021: сборник лучших докладов обучающихся факультета «Транспортное строительство», Санкт-Петербург, 19–26 апреля 2021 года / Под общей редакцией профессора Н. С. Бушуева; ответственные за выпуск Н. Н. Богомолова, Г. В. Сорокина. — СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2021. — С. 40–43.
6. Development of 400km/h-class high-speed railway infrastructure pilot application technology sub-task 3 “Study on design criteria for 400km/h-class track structures (Honam high-speed railway). Railway technology research project R&D-13PRTD-B056522-04” / Korea Railroad Facility Corporation. — Republic of Korea: Korea Railroad Facility Corporation, 2015. — 1676 p.
7. Эфиопские железные дороги и Korail подписали меморандум о взаимопонимании. — URL: <https://t.me/tzdjournal/5084> (дата обращения: 11.03.2025).
8. CAF и Hyundai Rotem поставят 150 поездов в Марокко. — URL: <https://t.me/tzdjournal/5041> (дата обращения: 28.02.2025).
9. Стартовала работа над ТЭО ВСМ в Узбекистане. — URL: <https://t.me/tzdjournal/4984> (дата обращения: 17.02.2025).
10. Зависимость Китая от зарубежных технологий. — URL: <https://lk.iccaras.ru/assets/components/dsgfileupload/files/4d261c9.pdf> (дата обращения: 17.02.2025).
11. Протяженность сети ВСМ в Китае достигла 48 тысяч километров. — URL: <https://zdmira.com/news/protyazhennost-seti-vsm-v-kitae-dostigla-48-tysyach-kilometrov> (дата обращения: 17.02.2025).
12. Китай увеличит сеть ВСМ еще на четверть. — URL: <https://t.me/tzdjournal/4897> (дата обращения: 28.01.2025).
13. Стратегия развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 г. — URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/1/1010> (дата обращения: 15.09.2024).

14. Шварцфельд В. С. Сравнительный анализ международных стандартов по безопасности: габариты на высокоскоростных железных дорогах / В. С. Шварцфельд, Е. Г. Рейн // Инфраструктура транспорта. — 2023.
15. Рейн Е. Г. К вопросу о проектировании высокоскоростных железных дорог (ВСЖМ) России по международным стандартам / Е. Г. Рейн, В. С. Шварцфельд // Проектирование, строительство и эксплуатация транспортной инфраструктуры: материалы научно-практической конференции памяти профессоров, докторов технических наук С. П. Першина и И. В. Турбина, 26–27 марта 2025 г., Москва / Российский университет транспорта. — М., 2025. — С. 258–262.
16. «Уральские локомотивы» получают 12 млрд за первые поезда для ВСМ. — URL: <https://ekb.rbc.ru/ekb/freenews/661d28319a794780af4ea7da> (дата обращения: 15.04.2024).
17. 3세대 고속열차시대 개막 초읽기...현대로템 'KTX-청룡' 운행 앞두고 안전·승차감 집중점. URL: <https://news.nate.com/view/20240409n27805> (дата обращения: 09.04.2024).
18. KTX-산천. — URL: <https://ko.wikipedia.org/wiki/KTX-산천> (дата обращения: 01.04.2024).
19. KTX-청룡, 90만이 사랑한 고속철도열차로 '발돋움'. — URL: <https://daily.hankooki.com/news/articleView.html?idxno=1178591> (дата обращения: 11.02.2025).
20. KTX-이음. — URL: <https://ko.wikipedia.org/wiki/KTX-이음> (дата обращения: 01.04.2024).
21. CR400. — URL: <https://ko.wikipedia.org/wiki/CR400> (дата обращения: 01.04.2024).
22. N700S Series Shinkansen. — URL: https://en.wikipedia.org/wiki/N700S_Series_Shinkansen (дата обращения: 01.04.2024).
23. ALFA-X // Электронный ресурс. — URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/ALFA-X> (дата обращения: 01.04.2024).
24. Renfe Class 100. — URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Renfe_Class_100 (дата обращения: 01.04.2024).
25. Renfe Class 102. — URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Renfe_Class_102 (дата обращения: 01.04.2024).
26. Renfe Class 103. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Renfe_Class_103 (дата обращения: 01.04.2024).
27. ICE 1. — URL: https://en.wikipedia.org/wiki/ICE_1 (дата обращения: 01.04.2024).
28. ICE 2. — URL: https://en.wikipedia.org/wiki/ICE_2 (дата обращения: 01.04.2024).
29. ICE 3. — URL: https://en.wikipedia.org/wiki/ICE_3 (дата обращения: 01.04.2024).
30. ICE 4. — URL: https://en.wikipedia.org/wiki/ICE_4 (дата обращения: 01.04.2024).
31. Первый российский высокоскоростной поезд получит название «Белый кречет». — URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/news/pervyy-rossiyskiy-vysokoskorostnoy-poezd-poluchit-nazvanie-belyy-krechet/> (дата обращения: 23.12.2024).
32. Конструкционные скорости, осевые нагрузки в служебном состоянии с учетом номинальной заселенности пассажирами электропоездов ЭВС «Аллегро». — URL: <https://base.garant.ru/55170452/de40175ab12d04d68f792b5b742a18fc/> (дата обращения: 01.04.2024).
33. Поезд Стриж. — URL: <https://bilety-na-poezd.com/poezd/poezd-strizh/> (дата обращения: 01.04.2024).
34. РЖД не пожалели миллиарды на олимпийские электровозы. — URL: <https://www.bfm.ru/news/55703> (дата обращения: 01.04.2024).

35. Минэкономразвития предложило РЖД разорвать контракт на закупки «Ласточек». — URL: <https://www.interfax.ru/business/399383> (дата обращения: 01.04.2024).
36. Суд в Москве обязал Siemens исполнить контракт 2019 г. на поставку 13 «Сапсанов» для РЖД. — URL: <https://www.interfax.ru/business/889024> (дата обращения: 01.04.2024).
37. Узбекистан завершил строительство высокоскоростной железной дороги для поездов Hyundai Rotem. — URL: <https://eurasiatoday.ru/uzbekistan-zavershil-stroitelstvo-vysokoskorostnoj-zheleznoj-dorogi-dlya-poezdov-hyundai-rotem/> (дата обращения: 07.05.2025).
38. Индия: на ВСМ Мумбаи — Ахмадабад построен десятый мост из 24 по проекту. — URL: <https://zdmira.com/news/indiya-na-vsm-mumbai-akhmadabad-postroen-desyatyj-most-iz-24-po-proektu> (дата обращения: 01.05.2025).
39. Китай строит Шелковый путь в Иран. — URL: https://www.alt.ru/logistics_news/40009/ (дата обращения: 01.04.2024).
40. Alstom's team in Brazil transfers technology to South Africans in the largest project in the company's history. — URL: <https://www.alstom.com/press-releases-news/2017/9> (дата обращения: 01.05.2025).
41. North-South high-speed railway: Can Vietnam master the technology? — URL: <https://vietnamnet.vn/en> (дата обращения: 02.12.2024).
42. Haramain High Speed Railway. — URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Haramain_High_Speed_Railway (дата обращения: 02.12.2024).
43. SA Can Learn From Top Trends in the Global Rail Industry. URL: <https://sabusinessintegrator.co.za/latest-news> (дата обращения: 14.11.2024).
44. В Италии построят сеть высокоскоростных железнодорожных линий, протяженность которых к 2008 году составит 1 тыс. км. — URL: <https://www.rzd.ru/ru/9284/page/3102?id=8120> (дата обращения: 01.04.2024).
45. Представлен проект Калифорнийской высокоскоростной железной дороги. — URL: <https://rossaprimavera.ru/news/537e8a8d> (дата обращения: 27.06.2024).
46. ВСМ в Индонезии, построенная в рамках инициативы «Один пояс — один путь», должна быть открыта в июле. — URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/news> (дата обращения: 01.04.2024).
47. «Один пояс — один путь»: что нужно знать о проекте. — URL: <https://www.kommersant.ru/doc/6282836> (дата обращения: 01.04.2024).
48. Строительство ВСМ «Евразия» от Германии до Китая может завершиться в 2026 году. — URL: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=141980> (дата обращения: 01.04.2024).
49. Высокоскоростной наземный транспорт по странам. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Высокоскоростной_наземный_транспорт (дата обращения: 01.04.2024).
50. Между Германией и Италией планируются новые высокоскоростные маршруты. — URL: <https://t.me/tzdjournal/5410> (дата обращения: 27.05.2025).
51. 발트3국, '러 위협'에 870km 고속철도 건설...36조원 규모. — URL: <https://www.electimes.com/news/articleView.html?idxno=345969> (дата обращения: 14.11.2024).

Дата поступления: 24.07.2025

Решение о публикации: 29.07.2025

Контактная информация:

РЕЙН Елена Геннадьевна — аспирант; reyn00_62@mail.ru

ШВАРЦФЕЛЬД Вячеслав Семенович — д-р техн. наук, проф.; v_s_s_@mail.ru

Design of High-Speed Railway Lines in Russia Based on the International Standard Gauge of 1435 mm

E. G. Rein, V. S. Shvartcfeld

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Rein E. G., Shvartcfeld V. S. Design of High-Speed Railway Lines in Russia Based on the International Standard Gauge of 1435 mm. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 3, pp. 76–90. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-76-90

Summary

Purpose: To investigate the potential for the integration of international expertise in the design and construction of high-speed railways (HSR) within the Russian context. **Methods:** A comprehensive analysis of extant literature on the subject, both domestic and international, in addition to open sources, has been conducted. **Results:** A tendency towards the adoption and adaptation of foreign technologies in Russia with a view to the creation of new high-speed railway networks has been defined. **Practical significance:** A structured analysis, research and development of international practices will allow for the creation of a modern and technologically advanced high-speed network in Russia.

Keywords: High-speed railway (HSR), HSR design, international standard, integration of international experience, international standard gauge of 1435 mm, high-speed rolling stock.

References

1. Kiselev I. P., Blazhko L. S., Bryn M. Ya. et al. *Vysokoskorostnoy zheleznodorozhnyy transport. Obshchiy kurs: uchebnoe posobie dlya studentov vuzov zheleznodorozhnogo transporta v 2 tomakh; pod red. I. P. Kiseleva; dopushcheno Federal'nym agentstvom zheleznodorozhnogo transporta. T. 1, 2-e iz-danie, pererabotannoe i dopolnennoe* [High-speed rail transport. General course: a textbook for students of higher education institutions of railway transport in 2 volumes; edited by I. P. Kiselev; approved by the Federal Agency for Railway Transport, vol. 1, 2nd edition, revised and supplemented]. Moscow: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe uchrezhdenie dopolnitel'nogo professional'nogo obrazovaniya "Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte" Publ., 2020, 428 p. (In Russian)
2. Kiselev I. P. Kratkiy obzor istorii vysokoskorostnykh poezdov v Yaponii. Chast' 1 [A brief overview of the history of high-speed trains in Japan. Part 1]. *Zheleznnye dorogi mira* [Railways of the World]. 2005, Iss. 7, p. 1. (In Russian)

3. *TGV. Istoriya sozdaniya* [TGV. History of creation]. Available at: https://pikabu.ru/story/tgv_istoriya_sozdaniya_6779069 (accessed: February 1, 2025). (In Russian)
4. Rodchenko V. A., Zandarashvili D. S. *Vysokoskorostnoe zheleznodorozhnoe dvizhenie. Mirovoy opyt i perspektivy v Rossii: uchebnoe posobie* [High-speed railway traffic. World experience and prospects in Russia: textbook]. Moscow: MIIT Publ., 2015, 116 p. (In Russian)
5. Reyn E. G., Bobarykin P. V. Iz istorii zheleznykh dorog Korei [From the history of Korean railways]. *Nedelya nauki — 2021: sbornik bestshchikh dokladov* [Science Week — 2021: collection of best reports]. St. Petersburg: Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I Publ., 2021, pp. 40–43. (In Russian)
6. Development of 400km/h-class high-speed railway infrastructure pilot application technology sub-task 3 “Study on design criteria for 400km/h-class track structures (Honam high-speed railway). Railway technology research project R&D-13PRTD-B056522-04”. Korea Railroad Facility Corporation, Republic of Korea, 2015, 1676 p.
7. *Efiopskie zheleznye dorogi i Korail podpisali memorandum o vzaimoponimanii* [Ethiopian Railways and Korail signed a memorandum of understanding]. Available at: <https://t.me/tzddjournal/5084> (accessed: March 11, 2025). (In Russian)
8. *CAF i Hyundai Rotem postavyat 150 poezdov v Marokko* [CAF and Hyundai Rotem will supply 150 trains to Morocco]. Available at: <https://t.me/tzddjournal/5041> (accessed: February 28, 2025). (In Russian)
9. *Startovala rabota nad TEO VSM v Uzbekistane* [Work has begun on the feasibility study of HSR in Uzbekistan]. Available at: <https://t.me/tzddjournal/4984> (accessed: February 17, 2025). (In Russian)
10. *Zavisimost' Kitaya ot zarubezhnykh tekhnologiy* [China's dependence on foreign technologies]. Available at: <https://lk.iccaras.ru/assets/components/dsgfileupload/files/4d261c9.pdf> (accessed: February 17, 2025). (In Russian)
11. *Protyazhennost' seti VSM v Kitae dostigla 48 tysyach kilometrov* [The length of the HSR network in China has reached 48 thousand kilometers]. Available at: <https://zdmira.com/news/protyazhennost-seti-vsm-v-kitae-dostigla-48-tysyach-kilometrov> (accessed: February 17, 2025). (In Russian)
12. *Kitay uvelichit set' VSM eshche na chetvert'* [China will increase the HSR network by another quarter]. Available at: <https://t.me/tzddjournal/4897> (accessed: January 28, 2025). (In Russian)
13. *Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v RF do 2030 g.* [Strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030]. Available at: <https://mintrans.gov.ru/documents/1/1010> (accessed: September 15, 2025). (In Russian)
14. Shvartsfeld V. S., Reyn E. G. Sravnitel'nyy analiz mezhdunarodnykh standartov po bezopasnosti: gabarit na vysokoskorostnykh zheleznykh dorogakh [Comparative analysis of international safety standards: dimensions on high-speed railways]. *Infrastruktura transporta* [Transport Infrastructure]. 2023. (In Russian)
15. Reyn E. G., Shvartsfeld V. S. K voprosu o proektirovanii vysokoskorostnykh zheleznykh dorog (VSZhM) Rossii po mezhdunarodnym standartam [On the issue of designing high-speed railways

(HSR) in Russia according to international standards]. *Proektirovanie, stroitel'stvo i ekspluatatsiya transportnoy infrastruktury: materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Design, construction and operation of transport infrastructure: materials of the scientific and practical conference]. Moscow: Rossiyskiy universitet transporta Publ., 2025, pp. 258–262. (In Russian)

16. “*Uralskie lokomotivy*” poluchat 12 mlrd za pervye poyezda dlya VSM [“Ural Locomotives” will receive 12 billion for the first trains for HSR]. Available at: <https://ekb.rbc.ru/ekb/free-news/661d28319a794780af4ea7da> (accessed: April 15, 2024). (In Russian)

17. 3세대 고속열차시대 개막 초읽기...현대로템 ‘KTX-청룡’ 운행 앞두고 안전·승차감 집중점. Available at: <https://news.nate.com/view/20240409n27805> (accessed: April 9, 2024). (In Korean)

18. KTX-산천. Available at: <https://ko.wikipedia.org/wiki/KTX-산천> (accessed: April 1, 2024). (In Korean)

19. KTX-청룡, 90만이 사랑한 고속철도열차로 ‘발돋움’. Available at: <https://daily.hankooki.com/news/articleView.html?idxno=1178591> (accessed: February 11, 2025). (In Korean)

20. KTX-이음. Available at: <https://ko.wikipedia.org/wiki/KTX-이음> (accessed: April 1, 2024). (In Korean)

21. CR400. Available at: <https://ko.wikipedia.org/wiki/CR400> (accessed: April 1, 2024). (In Korean)

22. N700S Series Shinkansen. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/N700S_Series_Shinkansen (accessed: April 1, 2024).

23. ALFA-X. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/ALFA-X> (accessed: April 1, 2024).

24. Renfe Class 100. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Renfe_Class_100 (accessed: April 1, 2024).

25. Renfe Class 102. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Renfe_Class_102 (accessed: April 1, 2024).

26. Renfe Class 103. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Renfe_Class_103 (accessed: April 1, 2024).

27. ICE 1. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/ICE_1 (accessed: April 1, 2024).

28. ICE 2. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/ICE_2 (accessed: April 1, 2024).

29. ICE 3. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/ICE_3 (accessed: April 1, 2024).

30. ICE 4. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/ICE_4 (accessed: April 1, 2024).

31. *Pervyy rossiyskiy vysokoskorostnoy poezd poluchit nazvanie “Belyy krechet”* [The first Russian high-speed train will receive the name “White Falcon”]. Available at: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/news/pervyy-rossiyskiy-vysokoskorostnoy-poezd-poluchit-nazvanie-belyy-krechet/> (accessed: December 23, 2024). (In Russian)

32. *Konstruktsionnye skorosti, osevyie nagruzki v sluzhebnoy sostoyanii s uchetom nominal'noy zaslenosti passazhirami elektropoezdov EVS “Allegro”* [Design speeds, axle loads in service condition taking into account nominal passenger occupancy of EVS “Allegro” electric trains]. Available at: <https://base.garant.ru/55170452/de40175ab12d04d68f792b5b742a18fc/> (accessed: April 1, 2024). (In Russian)

33. *Poyezd Strizh* [Train “Strizh”]. Available at: <https://bilety-na-poezd.com/poezd/poezd-strizh/> (accessed: 01.04.2024). (In Russian)
34. *RZD ne pozheleli milliardy na olimpiyskiye elektrovozy* [RZD did not spare billions on Olympic electric locomotives]. Available at: <https://www.bfm.ru/news/55703> (accessed: April 1, 2024). (In Russian)
35. *Mindekonomiki predlozhilo RZD razorvat’ kontrakt na zakupki “Lastochek”* [The Ministry of Economic Development proposed that RZD terminate the contract for the purchase of “Lastochka”]. Available at: <https://www.interfax.ru/business/399383> (accessed: April 1, 2024). (In Russian)
36. *Sud v Moskve obyazal Siemens ispolnit’ kontrakt 2019 g. na postavku 13 “Sapsanov” dlya RZD* [The Moscow court ordered Siemens to fulfill the 2019 contract for the supply of 13 “Sapsan” for RZD]. Available at: <https://www.interfax.ru/business/889024> (accessed: April 1, 2024). (In Russian)
37. *Uzbekistan zavershil stroitel’sтво vysokoskorostnoy zheleznoy dorogi dlya poyezdov Hyundai Rotem* [Uzbekistan completed the construction of a high-speed railway for Hyundai Rotem trains]. Available at: <https://eurasiatoday.ru/uzbekistan-zavershil-stroitelstvo-vysokoskorostnoj-zheleznoj-dorogi-dlya-poezdov-hyundai-rotem/> (accessed: May 7, 2025). (In Russian)
38. *Indiya: na VSM Mumbai — Akhmadabad postroen desyatyy most iz 24 po proyektu* [India: on the HSR Mumbai — Ahmadabad, the tenth bridge out of 24 according to the project has been built]. Available at: <https://zdmira.com/news/indiya-na-vsm-mumbai-akhmadabad-postroen-desyatyy-most-iz-24-po-proektu> (accessed: May 1, 2025). (In Russian)
39. *Kitay stroit Shelkovyy put’ v Iran* [China is building the Silk Road to Iran]. Available at: https://www.alta.ru/logistics_news/40009/ (accessed: April 1, 2024). (In Russian)
40. Alstom’s team in Brazil transfers technology to South Africans in the largest project in the company’s history. Available at: <https://www.alstom.com/press-releases-news/2017/9> (accessed: May 1, 2025).
41. North-South high-speed railway: Can Vietnam master the technology? Available at: <https://vietnamnet.vn/en> (accessed: December 2, 2024).
42. Haramain High Speed Railway. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Haramain_High_Speed_Railway (accessed: December 2, 2024).
43. SA Can Learn from Top Trends in the Global Rail Industry. Available at: <https://sabusinessintegrator.co.za/latest-news> (accessed: November 14, 2024).
44. *V Italii postroyat set’ vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh liniy, protyazhennost’ kotorykh k 2008 godu sostavit 1 tys. km* [In Italy, a network of high-speed railway lines will be built, the length of which will be 1 thousand km by 2008]. Available at: <https://www.rzd.ru/ru/9284/page/3102?id=8120> (accessed: April 1, 2024). (In Russian)
45. *Predstavlen proyekt Kaliforniyskoy vysokoskorostnoy zheleznoy dorogi* [The project of the California high-speed railway has been presented]. Available at: <https://rossaprimavera.ru/news/537e8a8d> (accessed: June 27, 2024). (In Russian)
46. *VSM v Indonezii, postroennaya v ramkakh initsiativy “Odin poyas — odin put’ ”, dolzhna byt’ otkryta v iyule* [The HSR in Indonesia, built as part of the “One Belt — One Road” initiative,

should be opened in July]. Available at: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/news> (accessed: April 1, 2024). (In Russian)

47. “*Odin poyas — odin put’*”: *chto nuzhno znat’ o projekte* [“One Belt — One Road”: what you need to know about the project]. Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/6282836> (accessed: April 1, 2024). (In Russian)

48. *Stroitel'stvo VSM “Evraziya” ot Germanii do Kitaya mozhet zavershitsya v 2026 godu* [The construction of the Eurasia HSR from Germany to China may be completed in 2026]. Available at: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=141980> (accessed: April 1, 2024). (In Russian)

49. *Vysokoskorostnoy nazemnyy transport po stranam* [High-speed ground transport by country]. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Высокоскоростной_наземный_транспорт (accessed: April 1, 2024). (In Russian)

50. *Mezhdue Germaniei i Italiei planiruyutsya novye vysokoskorostnye marshruty* [New high-speed routes are planned between Germany and Italy]. Available at: <https://t.me/tzdsjournal/5410> (accessed: May 27, 2025). (In Russian)

51. 발트3국, ‘러 위협’에 870km 고속철도 건설...36조원 규모. Available at: <https://www.electimes.com/news/articleView.html?idxno=345969> (accessed: November 14, 2024). (In Korean)

Received: July 24, 2025

Accepted: July 29, 2025

Author's information:

Elena G. REIN — Postgraduate Student; reyn00_62@mail.ru

Vyacheslav S. SHVARTCFELD — Dr. Sci. in Engineering; Professor, v_s_s_@mail.ru

УДК 625.031

Лабораторные испытания виброизоляционных свойств упругих подбалластных материалов

Н. К. Маслов¹, Т. Ю. Вальцева², А. А. Сайдалиев¹

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

²Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 690021, Хабаровск, ул. Серышева, 47

Для цитирования: Маслов Н. К., Вальцева Т. Ю., Сайдалиев А. А. Лабораторные испытания виброизоляционных свойств упругих подбалластных материалов // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 3. — С. 91–106. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-91-106

Аннотация

Цель: Определение эффективности виброизоляции упругих подбалластных материалов при вибродинамическом воздействии. **Методы:** В ходе экспериментов моделировались реальные условия динамических нагрузок от подвижного состава при заданном диапазоне возбуждающих частот с использованием специализированного испытательного оборудования, что позволило оценить динамические характеристики и передаваемость вибрации двух образцов подбалластных матов разной толщины и плотности. **Результаты:** Определены динамические характеристики, и выявлена зависимость эффективности виброизоляции от частотного диапазона, типа материала и его жесткости. Оптимальная виброизоляция испытываемых образцов подбалластных матов наблюдается в диапазоне частот от 28 до 30 Гц, в котором жесткий и плотный образец UBM-1 демонстрируют лучшие упругодемпфирующие свойства, чем гибкий и утолщенный образец UBM-2. **Практическая значимость:** Исследование обеспечивает моделирование полевых условий и более точное представление о передаваемости вибрации и упругих свойствах подбалластных матов. Полученные результаты позволяют оптимизировать выбор виброизолирующих упругих материалов и определить эффективность виброизоляции в низкочастотной области, критичной для инфраструктуры, которая дает значимые показатели снижения уровня динамических воздействий, передаваемых на основание пути.

Ключевые слова: Виброизоляция, подбалластные маты, вибродинамическое воздействие, передаваемость вибрации, комплексный модуль упругости, коэффициент потерь, собственная частота колебаний.

Введение

Ежедневно современные железнодорожные пути подвергаются значительным вибродинамическим нагрузкам, вызванным движением скоростных и высокоскоростных поездов, что приводит к ускоренному износу элементов пути и ухудшению эксплуатационных характеристик, а также возникновению негативных факторов динамического воздействия.

Некоторые исследования показали, что на стыке колеса и рельса из-за прохождения нагрузки и динамических сил, вызванных неровностями колес и рельса, возникают колебания, которые передаются от рельса через балластную призму

к грунту пропорционально размеру неровностей и механическому сопротивлению колеса и рельса [1, 2].

Специальные исследования и практика эксплуатации бесстыкового пути показывают, что вибрационный характер действия сил значительно интенсифицирует его расстройство в профиле и требует дополнительных средств на устранение отступлений от норм [3].

Частотный анализ колебательного движения при воздействии импульса ускорения, выполненный отечественными исследователями, показал зависимость коэффициента передачи вибрации от шпалы к балласту при различных характеристиках упругой связи между ними и соотношениях вынужденной и собственной частот путем анализа передаточной функции системы на участке «шпала — основание». В момент, когда частота возмущающей силы меньше собственной частоты системы, коэффициент передачи от шпалы к основанию не может быть менее 1, и уменьшения доли передаваемых ускорений можно достичь за счет увеличения виброгашения. Оптимальная виброизоляция наступает, когда отношение возбуждающей частоты f к собственной частоте системы f_0 становится более $\sqrt{2}$ [3].

В связи с этим особую актуальность приобретают методы и технологии, направленные на эффективное гашение вибрации, одним из которых является использование упругих подбалластных материалов, способных снижать распространение волн в грунте при разных частотах динамического воздействия.

Согласно ГОСТ Р 70258—2022 упругие маты предназначены для уменьшения и оптимизации статического и динамического модулей упругости в целях снижения динамической нагрузки, передаваемой на верхнее строение пути [4].

Однако трактовка зарубежных норм для исследования статических и динамических характеристик подбалластных матов учитывает также и вязкоупругие параметры, например потери энергии материала при циклическом динамическом нагружении. Потери проявляются на графике зависимости напряжения от деформации в виде петли, площадь которой пропорциональна энергии, рассеянной за цикл, что свидетельствует о вязкоупругом поведении материала. Данный процесс связан с внутренним трением в материале при нагружении и разгрузке [5–7].

В более подробных зарубежных исследованиях вибрации на железнодорожных путях была разработана система виброизоляции подбалластными матами, которая, в свою очередь, настраивается путем регулировки динамической массы конструкции m , жесткости изоляционных материалов k и коэффициента потерь упругих элементов η [8, 9].

Основная цель данного исследования состоит в изучении расчетной методики виброизоляции верхнего строения пути упругими подбалластными матами посредством анализа результатов лабораторных испытаний в условиях, приближенных к реальным эксплуатационным.

Таким образом, задачами исследования стали: определение динамических характеристик упругих материалов и их зависимостей от частотного диапазона; расчет значений модуля упругости, потерь и жесткости вязкоупругих испытываемых материалов; оценка эффективности виброгашения при сравнении с нормативными значениями.

Экспериментальные материалы и методы

Материалы для проведения испытаний

Для достижения целей данного исследования в качестве тестовых образцов были использованы два вида подбалластных матов разной толщины и плотности. Линейные размеры испытываемых образцов были определены на основе площади распределения максимального напряжения и удовлетворялись требованиям ГОСТ Р 70258—2022 [4, п. 5.3].

Основные характеристики образцов приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Характеристики образцов резиновых матов

Характеристики	UBM-1	UBM-2
Длина × ширина × толщина, мм	300 × 300 × 9	300 × 300 × 12
Плотность, кг/м ³	2050	440

В табл. 1 стоит обратить внимание, что испытываемый образец UBM-1 имеет высокую плотность, которая превосходит данный показатель у образца UBM-2 более чем в 4,5 раза.

Оборудование для испытаний

Для оценки эффективности упругих свойств подбалластных матов в конструкции пути испытания проводились на испытательной установке, обеспечивающей динамическое нагружение с максимальной амплитудой по перемещению, представленной на рис. 1. Неподвижная опорная площадка, по центру которой устанавливается образец, представляет собой жесткую стальную плиту с размерами сторон $(320,0 \pm 5,0) \times (320 \pm 5,0)$ мм и толщиной не менее $(30 \pm 0,5)$ мм. Виброплита имеет габаритные размеры 350×350 мм и частоту вибрации 50 Гц.

Для испытаний использовался комплект акселерометров, позволяющих регистрировать амплитуду, скорость вибрации и истинную частоту с помощью регистрирующего прибора MIC 026.



Рис. 1. Испытательная установка. Автор: Н. К. Маслов

Проведение испытаний

Лабораторные испытания образцов проводились при нагрузках, соответствующих реальным условиям эксплуатации.

Статические испытания вибродемпфирующих материалов на сжатие заключались в определении входных и выходных параметров нагружения, при этом регистрация значений измеряемых параметров проводилась в течение всего процесса испытаний. Образцы испытания подвергались сжатию между параллельными металлическими пластинами с постоянной скоростью до достижения требуемой максимальной нагрузки [4, табл. 2]. Проведено пятикратное сжатие в диапазоне нагрузок $F_{\min} - F_{\max}$ со скоростью нагружения (900 ± 10) Н/с.

Для определения динамических характеристик и коэффициента передаваемости вибрации испытываемые образцы подвергались динамической циклической нагрузке с помощью испытательной установки для получения кривых зависимости динамической нагрузки от перемещения. Измерения динамических характеристик образцов были проведены для частот 1 Гц, 5, 10, 20 и 30 Гц. Приложение синусоидального воздействия осуществлялось на фиксированной частоте в течение не менее 60 с для каждого образца. Экспериментальные данные за последние 5 с извлекались для дальнейшего исследования.

Результаты и анализ испытаний

В результате лабораторных испытаний были получены значения максимальной и минимальной величин нагрузок и деформаций за каждый цикл, а также промежуточные значения нагрузок и деформаций в произвольные моменты времени t .

Для тестовых образцов определены значения удельной статической жесткости C_{stat} с допущением, что применяемый диапазон нагружения составляет 0,012–0,25 Н/мм², а оценочный диапазон 0,02–0,10 Н/мм².

Результаты испытаний представлены в виде графических зависимостей (рис. 2, 3) между статическим нагружением и смещением для двух образцов.

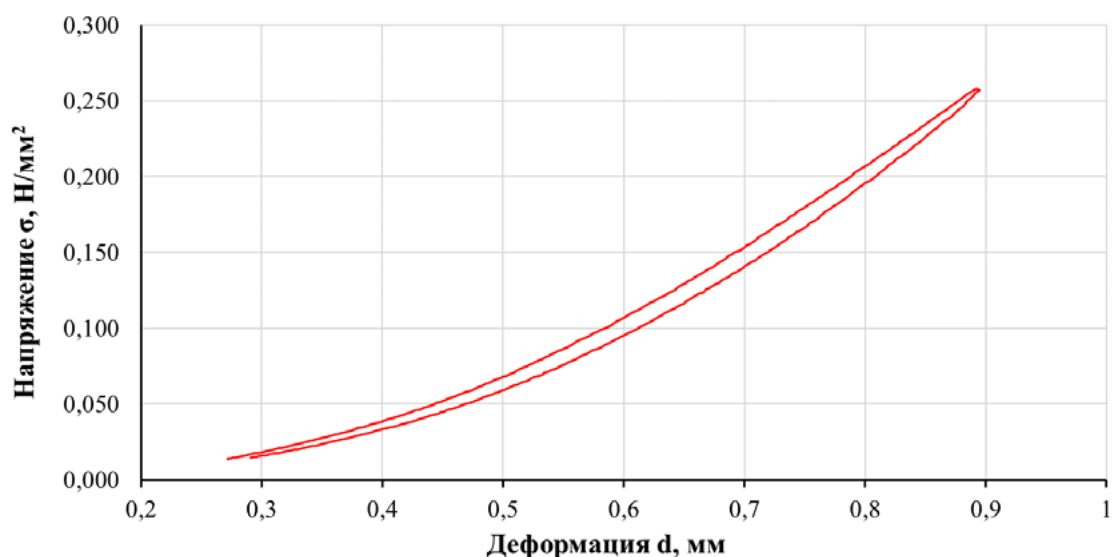


Рис. 2. Зависимость деформации от статической нагрузки образца UBM-1.

Автор: Н. К. Маслов

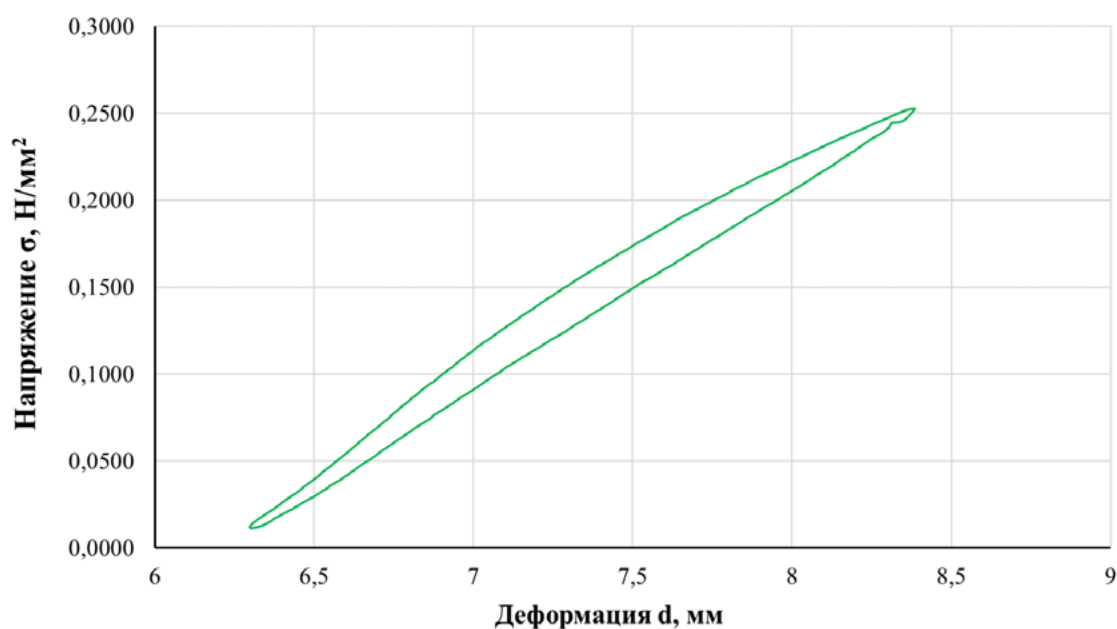


Рис. 3. Зависимость деформации от статической нагрузки образца UBM-2.

Автор: Н. К. Маслов

Из диаграмм видно, что кривые зависимости смещения от статической нагрузки демонстрируют очевидные нелинейные характеристики.

Деформация образца UBM-1 демонстрирует параболическую зависимость от прикладываемой нагрузки и достигает наибольшего прогиба порядка 0,89 мм при напряжении 0,25 Н/мм². При разгрузке кривая деформации не возвращается в исходную точку нагружения, что свидетельствует об остаточной деформации образца или некотором временном периоде после снятия нагрузки для возвращения образца в исходное состояние.

Деформация образца UBM-2, плавно возрастаая, демонстрирует зависимость, близкую к прямо пропорциональному типу. При приложении нагрузки деформация возрастает до 8,38 мм при изменении нагрузки от 0,011 до 0,25 Н/мм².

При сравнении упругих статических характеристик двух образцов подбалластных матов стоит заметить, что при идентичном диапазоне нагружения максимальный прогиб UBM-2 превышает значение данного параметра образца UBM-1 в 9,5 раза, что предварительно можно обосновать различными структурами и плотностью подбалластных матов.

Значения удельной динамической жесткости C_{dyn} определены для двух испытанных образцов с использованием динамического возбуждения при помощи пульсатора. Диапазон приложенных и оцененных нагрузок составлял 0,02–0,10 Н/мм². Результаты испытаний сведены в табл. 2, в которой приведены средние значения удельной динамической жесткости при разных частотах воздействия.

ТАБЛИЦА 2. Значения удельной статической и динамической жесткостей на низких частотах для двух образцов подбалластных матов

	Удельная статическая жесткость C_{stat} , Н/мм ³	Удельная динамической жесткость C_{dyn} , Н/мм ³				
		1 Гц	5 Гц	10 Гц	20 Гц	30 Гц
UBM-1	0,282	0,333	0,343	0,349	—	0,358
UBM-2	0,121	0,194	0,216	0,219	0,175	—

Динамические упругие характеристики образцов основаны на силовом управлении пульсатором с малыми амплитудами перемещений, зависящими от частоты, и представлены в виде диаграмм (рис. 4, 5).

На рис. 4 при приложении нагрузки с частотами 1 Гц, 5 и 30 Гц наблюдается практически одинаковый характер поведения кривых, близкий к линейному. В интервале частот деформация возрастает от 0,34 мм (1 Гц) и 0,35 мм (5 и 30 Гц) до 0,58 мм (1 Гц и 5 Гц) и 0,59 мм (30 Гц) при динамическом нагружении от 0,02–0,021 Н/мм² до 0,10–0,101 Н/мм² и при разгрузке, претерпевая некоторые потери, возвращается в исходную точку.

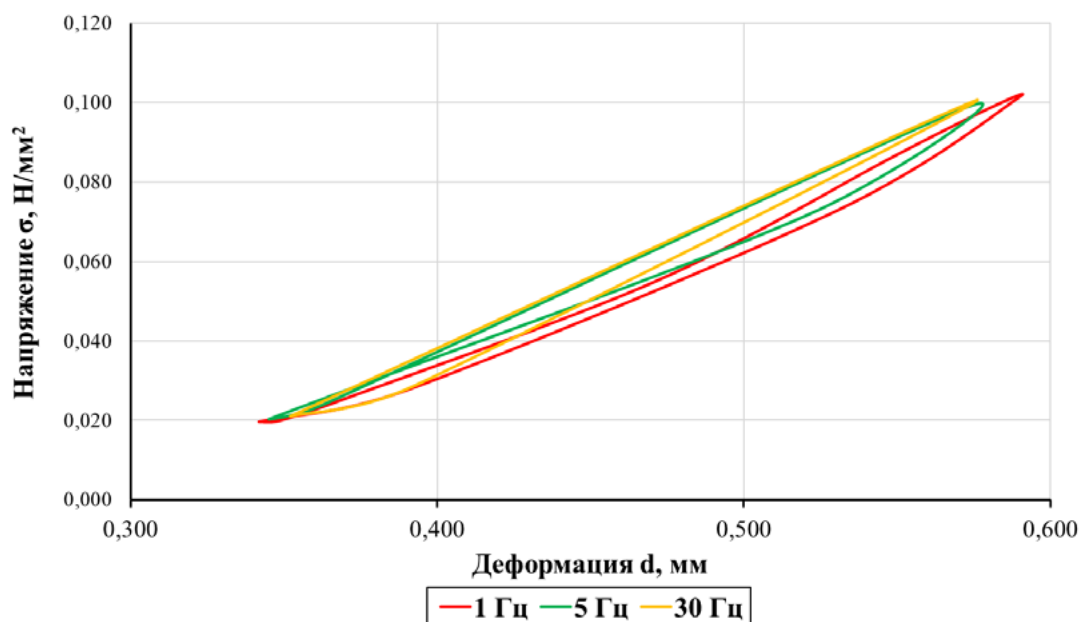


Рис. 4. Динамические упругие характеристики образца UBM-1. Автор: Н. К. Маслов

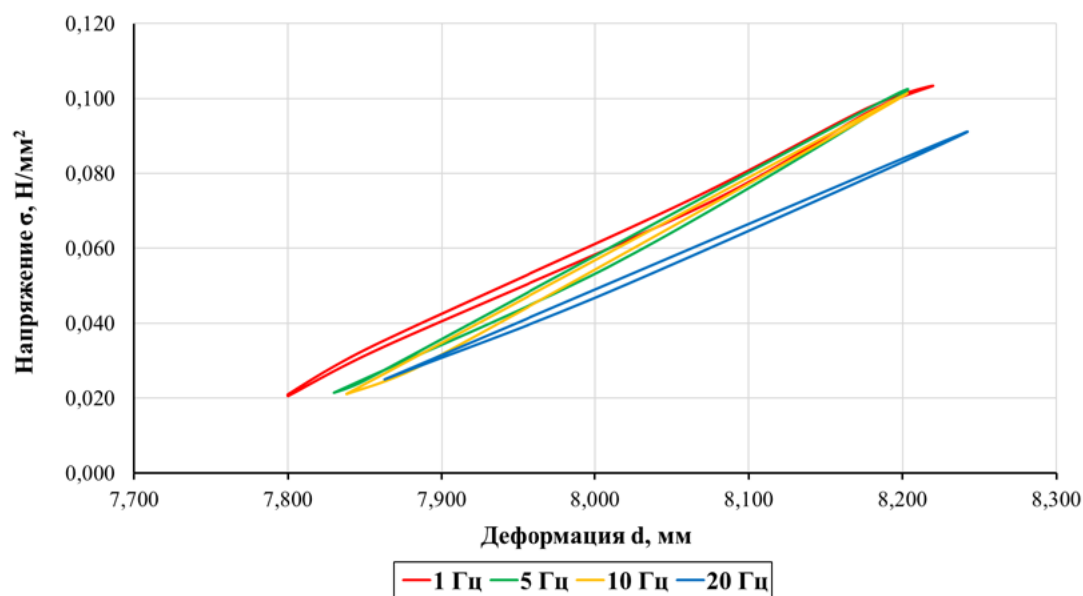


Рис. 5. Динамические упругие характеристики образца UBM-2. Автор: Н. К. Маслов

На рис. 5 зависимость упругого прогиба от динамической нагрузки показывает также близко линейные свойства образца. При частоте 1 Гц упругий прогиб изменяется от 7,80 до 8,22 мм в диапазоне динамических нагрузок от 0,021 до 0,103 Н/мм². При частотах 5 и 10 Гц деформация возрастает с 7,83 мм (5 Гц) и 7,84 мм (10 Гц) до 8,20 мм в интервале нагрузок от 0,021 до 0,102 Н/мм². При частоте воздействия 20 Гц образец демонстрирует иные упругие динамические показатели, при которых прогиб изменяется от 7,86 до 8,24 мм в диапазоне напряжений от 0,024 до 0,091 Н/мм².

Таким образом, по сравнению с результатами динамических характеристик в заданном частотном диапазоне, образец UBM-2 достигает наибольшего упругого прогиба при приложении динамической нагрузки, меньшей максимальной оценочной, что говорит об уменьшении жесткости образца при частоте воздействия 20 Гц.

На рис. 4 и 5 кривые зависимости смещения от нагрузки также представляют собой динамические гистерезисные характеристики, имеющие форму эллипса, что свидетельствует о вязкоупругих свойствах образцов подбалластных матов. Площадь эллипса соответствует величине демпфирования — чем больше площадь, тем эффективнее виброизоляция материала. Поскольку резина является однородным полимерным материалом, движение молекул при деформации не происходит мгновенно, так как притяжение между молекулами должно преодолеваться энергией колебаний атомов. Материал деформируется, но из-за вязкоупругого поведения деформация отстает от напряжения на величину угла потерь δ .

Согласно расчетам, приведенным в табл. 2, значение удельной динамической жесткости образцов больше значения удельной статической жесткости. Следовательно, когда деформация резинового материала происходит медленно, исходное состояние может быть легко восстановлено с течением времени. Если частота воздействия увеличивается, молекулам резины не хватает времени на перестройку, что приводит к очевидному и одновременному снижению эластичности и, как следствие, к более высокому значению динамической жесткости по сравнению со статической жесткостью. Кроме того, вычисляется эквивалентный динамический модуль упругости, который также может быть использован при анализе методом конечных элементов.

Значения динамической жесткости могут быть применимы для расчета функции передаваемости вибрации и вносимых потерь, которые являются результатом применения подбалластных матов в путевой структуре.

Сравнение площадей петель упругого гистерезиса, полученных при динамических испытаниях двух образцов на различных частотах, указывает на более высокую эффективность демпфирования образца UBM-1 на частотах 1 Гц, 5 и 10 Гц. Для определения точных и оптимальных значений виброизоляции проводились соответствующие расчеты.

Исходя из ГОСТ Р 58017—2017 [10], универсальной динамической характеристикой является величина комплексного модуля вязкоупругого материала, который подвергают воздействию синусоидальных колебаний.

Значение комплексного модуля определяется из выражения (1):

$$E^* = E' + iE'', \quad (1)$$

где E' — модуль упругости, МПа; E'' — модуль механических потерь, МПа.

Применяя метод преобразования эквивалентного модуля упругости и принимая верхний и нижний пределы нагрузки для испытываемых образцов при

динамическом воздействии, эквивалентный динамический модуль упругости вычисляется по формуле (2):

$$E_{dyn} = \sqrt{E'^2 + E''^2}. \quad (2)$$

В свою очередь, модуль упругости и модуль механических потерь определяются по формулам (3)–(4):

$$E' = \frac{\sigma_0 h}{\varepsilon_0} \cos \delta; \quad (3)$$

$$E'' = \frac{\sigma_0 h}{\varepsilon_0} \sin \delta, \quad (4)$$

где σ_0 — амплитуда напряжения, Н/мм²;
 ε_0 — амплитуда деформации, мм;
 h — толщина образца, мм;
 δ — фазовый угол сдвига между нагрузкой и перемещением, градусы.
 Жесткость испытываемых образцов рассчитывается по формуле (5):

$$k = \frac{E_{dyn} A}{h}, \quad (5)$$

где A — эффективная площадь подбалластного мата, мм².

Результаты расчета величин эквивалентного динамического модуля упругости и жесткости протестированных образцов подбалластных матов представлены в виде графических зависимостей от частотного диапазона нагружения на рис. 6 и 7 соответственно.

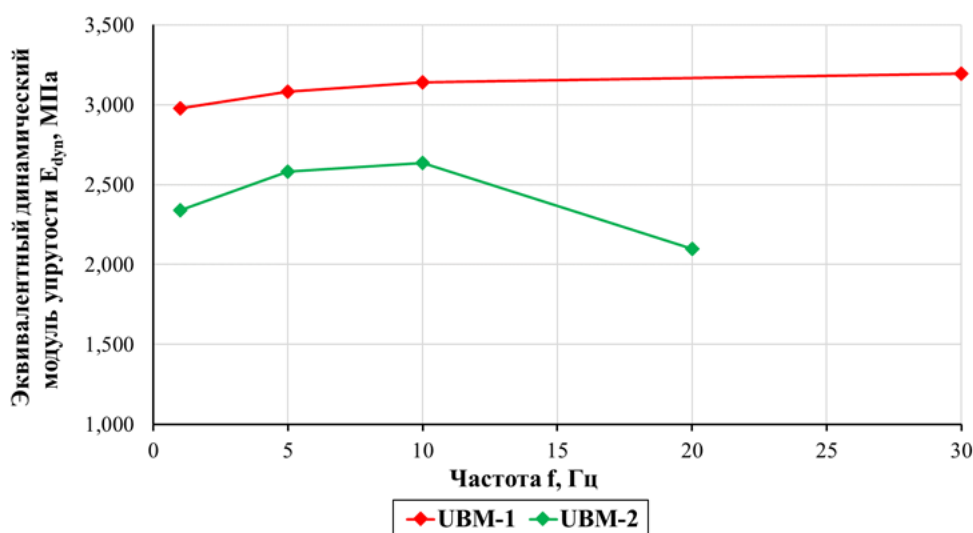


Рис. 6. Зависимость эквивалентного динамического модуля упругости E_{dyn} от частоты нагрузки для двух образцов подбалластных матов. Автор: Н. К. Маслов

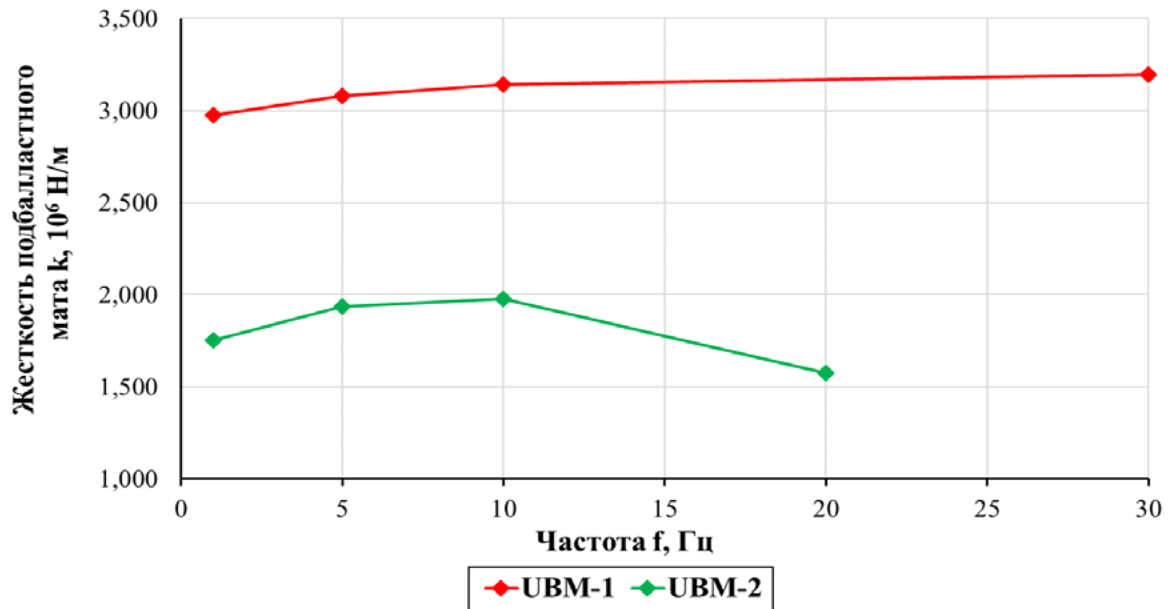


Рис. 7. Зависимость жесткости испытываемых образцов от частоты нагрузки.

Автор: Н. К. Маслов

Характер поведения кривых зависимостей динамического модуля упругости и жесткости от частоты идентичен. Динамические характеристики образца UBM-1 плавно возрастают с ростом частоты нагружения от 1 до 30 Гц — эквивалентный динамический модуль упругости изменяется от 2,98 до 3,19 МПа, а жесткость образца с похожей интенсивностью увеличивается с $2,98 \cdot 10^6$ до $3,19 \cdot 10^6$ Н/м.

Образец UBM-2 демонстрирует иную картину: его характеристики интенсивно возрастают при изменении частот до 10 Гц — динамический модуль упругости с 2,34 до 2,64 МПа и жесткость материала с $1,75 \cdot 10^6$ до $1,98 \cdot 10^6$ Н/м, однако на более высоких частотах описанные характеристики быстро идут на спад и при 20 Гц достигают минимума значений 2,10 МПа и $1,57 \cdot 10^6$ Н/м соответственно.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что образец мата UBM-1 сохраняет свои динамические свойства с ростом частотной характеристики воздействия, в то время как виброгасящий мат UBM-2 претерпевает усталостные изменения при циклическом нагружении на частотах воздействия более 10 Гц, частично теряет свои первоначальные упругие свойства и становится менее устойчивым к деформациям, что с практической точки зрения ведет к снижению эффективности демпфирования, т. е. материал хуже поглощает и рассеивает энергию колебаний, увеличивая передачу вибрации на основание.

Оптимальная виброизоляция системы достигается путем регулировки передаточной функции и определения численного значения коэффициента виброизоляции, представляющего собой отношение амплитуды вибрации на выходе системы к амплитуде вибрации на входе. Передаточную функцию системы можно представить формулой (6):

$$T = \frac{\sqrt{1 + \eta^2 \left(\frac{f}{f_0} \right)^2}}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 \right)^2 + \eta^2 \left(\frac{f}{f_0} \right)^2}}, \quad (6)$$

где η — коэффициент механических потерь, равный тангенсу фазового угла сдвига между динамической нагрузкой и перемещением;

f — частота воздействия, Гц;

f_0 — собственная частота, определяемая по формуле (7):

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (7)$$

где m — неподрессоренная масса колесной пары, ≈ 1800 кг.

Полученные значения коэффициента механических потерь на разных частотах показаны на рис. 8. Коэффициент потерь образца UBM-1 плавно уменьшается при возрастании частоты до 5 Гц и достигает своего минимального значения, демонстрируя наименьшую эффективность виброизоляционных свойств материала на низких частотах. Однако по мере возрастания частоты с 5 до 30 Гц он интенсивно изменяется от 0,138 до 0,251, что свидетельствует о росте способности рассеивать энергию колебаний и связано с изменением его внутренней структуры или условий нагружения. Коэффициент потерь образца UBM-2 показывает

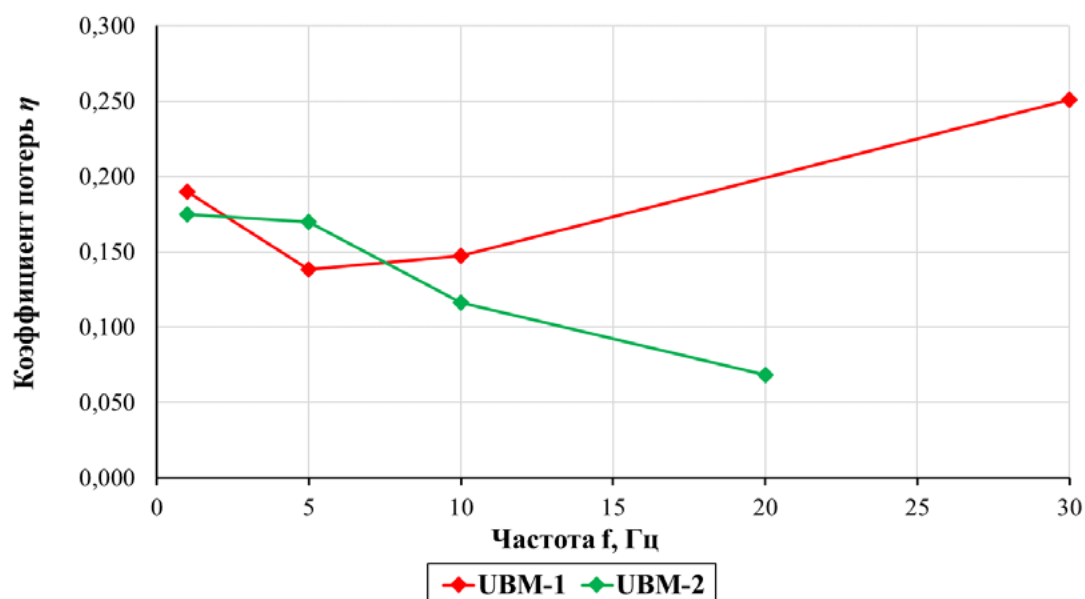


Рис. 8. Зависимость коэффициента потерь от частоты воздействия.

Автор: Н. К. Маслов

обратно пропорциональную зависимость — в процессе повышения частоты воздействующей силы величина потерь претерпевает изменения с 0,175 при 1 Гц до 0,068 при 20 Гц. Причиной может служить структурная перестройка резины при снижении гистерезиса из-за уменьшения внутреннего трения, вследствие чего образец становится более упругим, но хуже поглощает энергию, что увеличивает передачу колебаний к основанию.

Оптимальная виброизоляция достигается при отношении частоты нагружения к собственной частоте системы, равном более $\sqrt{2}$. При этом условии система работает в области, где инерционные силы доминируют над упругими. Виброизоляция эффективна, когда передаваемость $T < 1$, то есть амплитуда вибрации на выходе меньше, чем на входе. Результаты расчета передаваемости вибрации в зависимости от частотного диапазона нагружения представлены на рис. 9.

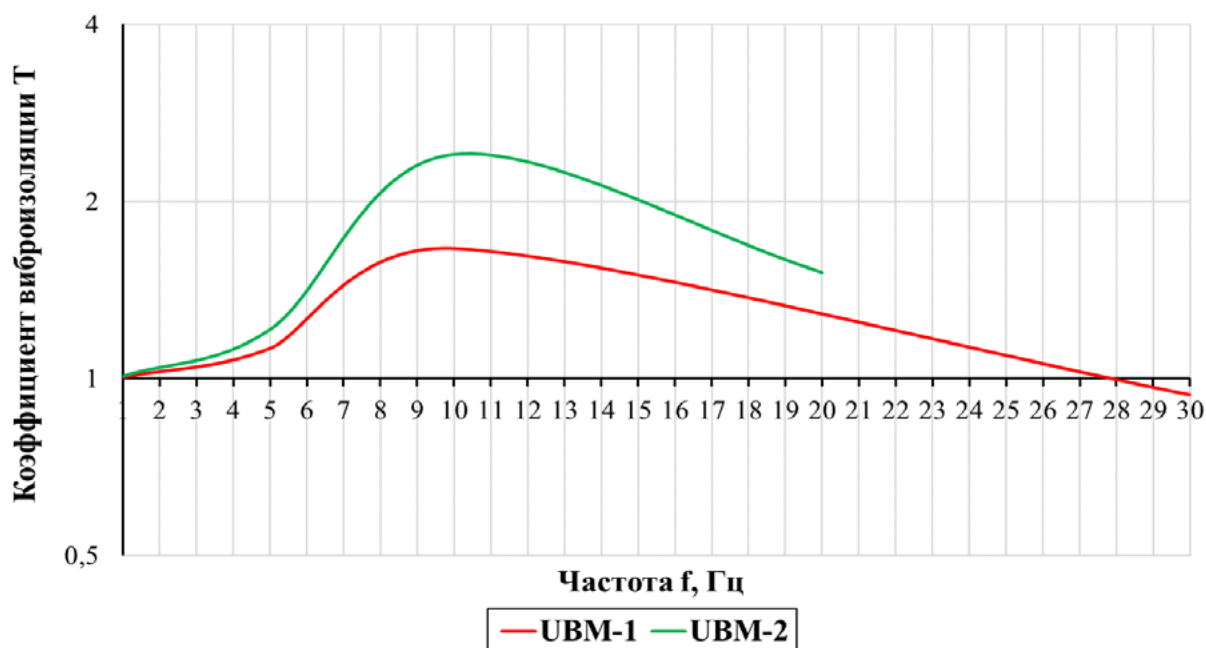


Рис. 9. Зависимость коэффициента виброизоляции от частоты воздействия.

Автор: Н. К. Маслов

График изменения коэффициента виброизоляции представляет собой логарифмическую функцию. Показатель передаваемости вибрации образца UBM-1 с увеличением интенсивности воздействия возрастает по параболической зависимости с 1,005 и достигает пика значения, равного 1,663 при 10 Гц. После чего постепенно уменьшается с ростом частоты, приобретая характер, близкий к линейному прямо пропорциональному типу, и доходит до значения 0,938 при 30 Гц. Из рис. 9 видно, что при частоте нагружения свыше 28 Гц исследуемый показатель по величине становится менее единицы, что свидетельствует об уменьшении амплитуды вибрации на выходе системы, по сравнению с амплитудой на входе. Коэффициент

виброизоляции образца UBM-2 демонстрирует идентичную зависимость параболического типа по мере возрастания частоты с 1 до 10 Гц, изменяясь с 1,008 до 2,408 и далее уменьшаясь до значения 1,515 при 20 Гц.

Сравнение полученных зависимостей позволяет сделать вывод, что подбалластный мат UBM-1 имеет лучшие свойства виброгашения по сравнению с UBM-2, достигая оптимальной виброизоляции в диапазоне частот от 28 до 30 Гц. Однако ввиду того, что образец UBM-2 не был испытан при частоте воздействия 30 Гц, нельзя с уверенностью говорить, что подбалластный мат не достигает оптимальной виброизоляции на более высоких частотах экспериментального диапазона.

Выводы

В ходе испытаний были определены динамические характеристики и оптимальные параметры виброизоляции исследуемых двух различных по толщине и плотности подбалластных матов, включая их коэффициент передаваемости вибрации, жесткость и коэффициент механических потерь, которые позволяют эффективно снижать динамические воздействия.

По результатам испытаний были сделаны следующие выводы:

1. Динамические характеристики исследуемых подбалластных матов являются гистерезисными, удельная динамическая жесткость образцов превосходит удельную статическую жесткость из-за вязкоупругих свойств.

2. Жесткость подбалластных матов заметно меняется при изменении уровня нагрузки. С ростом частоты воздействия показатель динамического модуля упругости и жесткости подбалластного мата UBM-1 стабильно прогрессивный, в то время как UBM-2 претерпевает усталостные изменения при циклическом нагружении на частотах свыше 10 Гц, в результате его жесткость уменьшается на 20 % при достижении частоты 20 Гц.

3. Резина UBM-1 имеет больший коэффициент потерь по сравнению с UBM-2, что указывает на лучшее внутреннее трение материала и высокую скорость поглощения энергии.

4. Плотность, толщина и структура материала, используемого в качестве виброизолятора, оказывают существенное влияние на значения динамического модуля упругости и жесткости, следовательно, влияют на эффективность изоляции вибраций. В рамках исследования более плотный и жесткий подбалластный мат демонстрирует лучшие виброизоляционные свойства, которые превосходят показатели гашения вибрации гибкого подбалластного мата на 7 % при 5 Гц и на 30 % при 10 Гц.

5. Оптимальная виброизоляция испытываемых подбалластных матов наблюдается в диапазоне частот от 28 Гц до 30 Гц.

Список источников

1. Ntotsios E. The effect of track load correlation on ground-borne vibration from railways / E. Ntotsios, D. Thompson, M. Hussein // *Journal of Sound and Vibration*. — 2017. — Vol. 402. — Pp. 142–163.
2. Kouroussis G. Railway ground vibrations induced by wheel and rail singular defects / G. Kouroussis, D. P. Connolly, G. Alexandrou, K. Vogiatzis // *Vehicle System Dynamics*. — 2015. — Vol. 53. — Iss. 10. — Pp. 1500–1519.
3. Управление надежностью бесстыкового пути / В. С. Лысюк, В. Т. Семенов, В. М. Ермаков; под ред. В. С. Лысюка. — М.: Транспорт, 1999. — 373 с.
4. ГОСТ Р 70258—2022. Маты подбалластные для виброизоляции конструкции верхнего строения пути. Методы испытаний. — М.: НИИСФ РААСН, 2022. — 12 с.
5. Kraskiewicz C. Static and dynamic characteristics of resilient mats for vibration isolation of railway tracks / C. Kraskiewicz, C. Lipko, M. Pludowska, A. Zbiciak // *Procedia Engineering*. — 2016. — Vol. 153. — Pp. 317–324.
6. DIN 45673-1:2010-08 Mechanical vibration. Resilient elements used in railway tracks. Part 1: Terms and definitions, classification, test procedures.
7. DIN V 45673-4-2008 Mechanical vibration. Resilient elements used in railway tracks. Part 4: Analytical evaluation of insertion loss of mounted track systems.
8. Wettschureck R. G. Vibration and structure-borne sound isolation by means of cellular polyurethane (PUR) elastomers / R. G. Wettschureck // *Proceedings Vibrationsdagen (SVIB)*. — Stockholm, Sweden, 1994. — Pp. 21–52.
9. Wettschureck R. G. Reduction of structure-borne noise emissions from above-ground railway lines by means of ballast mats / R. G. Wettschureck, M. Heim, S. Mühlbachler // *Proceedings Inter-noise 97*. — Budapest, 1997. — Pp. 577–580.
10. ГОСТ Р 58017—2017. Пластмассы. Определение механических свойств при динамическом нагружении. Сжатие. — М.: Стандартинформ, 2017. — 12 с.

Дата поступления: 04.06.2025

Решение о публикации: 11.07.2025

Контактная информация:

МАСЛОВ Никита Кахраманович — аспирант, инженер кафедры «Строительство дорог транспортного комплекса»; nikita.digital@mail.ru

ВАЛЬЦЕВА Татьяна Юрьевна — канд. техн. наук, доц. кафедры «Мосты, тоннели и подземные сооружения»; vtu25@mail.ru

САЙДАЛИЕВ Абдунаим Абдурауфович — аспирант кафедры «Строительство дорог транспортного комплекса»; saidaliev18@mail.ru

Laboratory Tests to Investigate the Vibration Isolation Properties of Elastic Under-Ballast Materials

N. K. Maslov¹, T. Yu. Valtseva², A. A. Saidaliev¹

¹Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²Far Eastern State Transport University, 47, Serishev str., Khabarovsk, 680021, Russian Federation

For Citation: Maslov N. K., Valtseva T. Yu., Saidaliev A. A. Laboratory Tests to Investigate the Vibration Isolation Properties of Elastic Under-Ballast Materials. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 3, pp. 91–106. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-91-106

Summary

Purpose: To ascertain the efficacy of vibration isolation of elastic under-ballast materials under vibrodynamic impact. **Methods:** In the course of the experiments, real conditions of dynamic loads from rolling stock were simulated at a given range of exciting frequencies using specialised test equipment. This made it possible to evaluate the dynamic characteristics and vibration transmissibility of two samples of under-ballast mats having different thickness and density. **Results:** A comprehensive investigation was conducted to ascertain the dynamic characteristics of the samples under study. This investigation revealed the dependence of vibration isolation efficiency on the frequency range, the type of material used, and its stiffness. Optimal vibration isolation of the tested samples of under-ballast mats was observed in the frequency range from 28 to 30 Hz. In this range, the rigid and dense sample UBM-1 demonstrates better damping properties than the flexible and thickened sample UBM-2. **Practical significance:** The study provides a comprehensive modelling of field conditions, facilitating a more precise understanding of vibration transmissibility and the elastic properties of under-ballast mats. The results obtained make it possible to optimise the choice of vibration-insulating elastic materials and determine the effectiveness of vibration isolation in the low-frequency range, critical for infrastructure. This provides significant indicators of reducing the level of dynamic impacts transmitted to the track base.

Keywords: Vibration isolation, under-ballast mats, vibrodynamic impact, vibration transmissibility, complex elastic modulus, loss factor, natural oscillation frequency.

References

1. Ntotsios E., Thompson D., Hussein M. The effect of track load correlation on ground-borne vibration from railways. *Journal of Sound and Vibration*, 2017, vol. 402, pp. 142–163.
2. Kouroussis G., Connolly D. P., Alexandrou G., Vogiatzis K. Railway ground vibrations induced by wheel and rail singular defects. *Vehicle System Dynamics*, 2015, vol. 53, Iss. 10, pp. 1500–1519.
3. Lysyuk V. S., Semenov V. T., Ermakov V. M.; ed. by Lysyuk V. S. *Upravlenie nadezhnost'yu besstykovogo puti* [Reliability management of continuous welded rail track]. Moscow: Transport Publ., 1999, 373 p. (In Russian)
4. *GOST R 70258—2022. Maty podballastnye dlya vibroizolyatsii konstruksii verkhnego stroeniya puti. Metody ispytaniy* [Subballast mats for vibration isolation of track superstructure. Testing methods]. Moscow: NIISF RAASN Publ., 2022, 12 p. (In Russian)

5. Kraskiewicz C., Lipko C., Pludowska M., Zbiciak A. Static and dynamic characteristics of resilient mats for vibration isolation of railway tracks. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 153, pp. 317–324. (In English)
6. DIN 45673-1:2010-08 Mechanical vibration. Resilient elements used in railway tracks. Part 1: Terms and definitions, classification, test procedures.
7. DIN V 45673-4-2008 Mechanical vibration. Resilient elements used in railway tracks. Part 4: Analytical evaluation of insertion loss of mounted track systems.
8. Wettschureck R. G. Vibration and structure-borne sound isolation by means of cellular polyurethane (PUR) elastomers. *Proceedings Vibrationsdagen (SVIB)*. Stockholm, Sweden, 1994, pp. 21–52. (In English)
9. Wettschureck R. G., Heim M., Mühlbacher S. Reduction of structure-borne noise emissions from above-ground railway lines by means of ballast mats. *Proceedings Inter-noise 97*, Budapest, 1997, pp. 577–580. (In English)
10. *GOST R 58017—2017. Plastmassy. Opredelenie mekhanicheskikh svoystv pri dinamicheskoy nagruzhении. Szhatiya* [GOST R 58017—2017. Plastics. Determination of mechanical properties under dynamic loading. Compression]. Moscow: Standartinform Publ., 2017, 12 p. (In Russian)

Received: June 04, 2025

Accepted: July 11, 2025

Author's information:

Nikita K. MASLOV — Postgraduate Student, Engineer, Department “Construction of Roads of the Transport Complex”; nikita.digital@mail.ru

Tatyana Yu. VALTSEVA — PhD in Engineering, Associate Professor, Department “Bridges, Tunnels and Underground Structures”; vtu25@mail.ru

Abdunaim A. SAIDALIEV — Postgraduate Student, Department “Construction of Roads of the Transport Complex”; saidaliev18@mail.ru

УДК 625.141

Сравнительный анализ модуля упругости балластной призмы при использовании технологий объемного уплотнения и традиционных методов выправки пути в условиях среднего ремонта железнодорожного полотна

Д. Н. Сомов¹, А. В. Петряев¹, И. Л. Парахненко², Н. И. Тенирядко³

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

²Уральский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

³Российский университет транспорта, Российская Федерация, 127994, Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9

Для цитирования: Сомов Д. Н., Петряев А. В., Парахненко И. Л., Тенирядко Н. И. Сравнительный анализ модуля упругости балластной призмы при использовании технологий объемного уплотнения и традиционных методов выправки пути в условиях среднего ремонта железнодорожного полотна // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 3. — С. 107–123. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-107-123

Аннотация

Цель: Определение модуля упругости балластной призмы и его неравномерности на участках пути, выправленных способом объемного уплотнения балласта технологической цепочкой путевых машин непрерывного действия (ВПО-С и МПВ), и балластной призмы, выправленной по существующей технологии с применением машин непрерывного и непрерывно-циклического действия (ВПО-С + Dynamic 09-3X) в полном цикле среднего ремонта пути (РС). **Методы:** Измерения проводились при вырезанном шпальном ящике до подошвы шпал динамическим плотномером грунтов ПДУ-МГ4.01 «Удар» с тщательным планированием места установки штампа. На каждый поперечный профиль балластной призмы выполнялось по семь измерений. **Результаты:** Модуль упругости объемного уплотнения балластной призмы участка пути, отремонтированного в объеме капитального ремонта пути третьего уровня и выправленного одинарным проходом машин непрерывного действия ВПО-С и комплекса МПВ, не меньше модуля упругости балластной призмы участков пути, выправленных одинарным проходом с двойной-тройной подбивкой шпал по существующей технологии машиной непрерывно-циклического действия Dynamic 09-3X. Предлагаемая технология обеспечивает требуемые параметры стабилизации пути балластной призмы без дополнительного использования машины динамической стабилизации типа ДСП. Состояние пути после завершения работ по предлагаемой технологии позволяет открывать движение поездов сразу же с проектной скоростью и обеспечивает пропускную способность участка. **Практическая значимость:** Внесение изменений в нормативные документы для снятия барьеров и препятствий при выполнении работ по ремонту пути с применением машин ВПО-С и МПВ. Внесение изменений в нормативные документы в части формирования нормативной базы по учету модуля упругости и деформации балластной призмы при выполнении работ по ремонту пути с применением различных машин, понятия — объемное уплотнение балластной призмы, состояние уплотнения, модуль упругости и модуль деформации балластной призмы и основной площадки земляного полотна и т. д. В процессе продолжения исследований необходимо разработать технологии выправки пути, обеспечивающие сохранение упругих и дренирующих свойств щебеночного балласта и увеличение жизненного цикла верхнего строения пути.

Ключевые слова: Модуль упругости, щебень, выправочные машины, балластная призма, шпальный ящик.

Введение

Балластная призма — ключевой элемент верхнего строения железнодорожного пути, обеспечивающий распределение нагрузки и устойчивость рельсошпальной решетки. Ее упругие и дренирующие свойства напрямую влияют на долговечность пути и безопасность движения. В последние годы внедрение новых технологий ремонта, таких как объемное уплотнение с применением машин непрерывного действия (ВПО-С, МПВ), требует комплексного анализа их эффективности в сравнении с традиционными методами (например, Dynamik 09-3X).

Основным инструментом для оценки упругих свойств балласта является динамический плотномер. Исследования [1, 2] подтвердили, что динамические плотномеры позволяют быстро и с высокой точностью определять деформационные характеристики грунтов, что важно для обеспечения качества ремонтных работ на пути. Важным аспектом является планирование мест установки штампа, что минимизирует влияние локальных неоднородностей балласта.

Технологии объемного уплотнения, основанные на непрерывном воздействии машин ВПО-С и МПВ, демонстрируют повышенную эффективность. Это связано с тем, что МПВ совмещает функции электробалластера, выправочно-подбивочно-отделочной машины, планировщика балласта, динамического стабилизатора пути и подбивочного блока [3]. Важным преимуществом является отсутствие необходимости в динамической стабилизации (ДСП), что сокращает время и стоимость работ.

Машины непрерывно-циклического действия, такие как Dynamik 09-3X, широко применяются в существующей практике. Однако введение новых технологий, высокие затраты на обслуживание техники и независимость от импорта обуславливают необходимость использования современных отечественных машин.

Внедрение технологии объемного уплотнения сталкивается с нормативными ограничениями. В автодорожном строительстве применяются измерения модуля деформации, на основе которого разработан стандарт [4].

Г. Г. Болдырев в своей монографии [5] отмечает, что деформационные характеристики грунтов, такие как модуль упругости и модуль деформации, зависят от метода их определения.

Наиболее информативными являются два способа:

- **статический метод** — непосредственные измерения на месте проведения строительных или ремонтных работ;
- **лабораторный метод** — трехосные стадиометрические испытания.

Однако первый метод сложно реализовать в условиях железной дороги, а второй, хотя и обеспечивает наиболее точные значения, требует значительного времени и не полностью соответствует реальным условиям.

По этой причине наиболее эффективными способами определения деформационных характеристик являются **динамические плотномеры**.

Необходимо отметить, что модуль упругости всегда больше модуля общей деформации и определяется при разгрузке образца, в то время как модуль деформации, характеризующий поведение грунта не только при наличии упругих, но и остаточных деформаций, вычисляется при нагружении образца [6]. В СП [7] дается приблизительная разница между упругим модулем и модулем деформации — примерно в 5 раз.

Таким образом, задачами измерений стали:

1. Определение значений модуля упругости балластной призмы измерителем модуля упругости ПДУ-МГ4.01 «УДАР» до выполнения работ по глубокой очистке балластной призмы и после выправленной машинами непрерывного способа действия ВПО-С, МПВ и непрерывно-циклического способа действия типа Dynamic 09-3X.

2. Получение подтверждения технологии качественной выправки пути с объемным уплотнением балластной призмы машиной МПВ без применения машин с непрерывно-циклическим способом действия и динамического стабилизатора ДСП.

3. Получить подтверждение об отсутствии необходимости проведения послеосадочной выправки пути.

Измерительное оборудование и методика

Измерительное оборудование

При выполнении измерений методом динамического нагружения используется штамповая установка динамического нагружения — измеритель модуля упругости грунтов и оснований дорог ПДУ-МГ4.01 «УДАР» (см. рис. 1).

Динамический измерительный комплекс ПДУ-МГ4.01 «УДАР» служит для определения упругих характеристик грунтовых массивов и дорожных конструкций. Принцип работы основан на фиксации величины смещения штампа и регистрации импульсного воздействия, прилагаемого к жесткому цилиндрическому индентору. Основная сфера использования устройства — проверка степени уплотнения земляного полотна и балластной призмы ж/д путей. Конструкция динамического штампа обязана обеспечивать фиксацию деформационных изменений с максимальной погрешностью до 5 % от фактического значения и включать в себя следующие составные части:

- 1) механизм нагружения — падающий по направляющей штанге груз, создающий импульс нагружения до 10 кН;

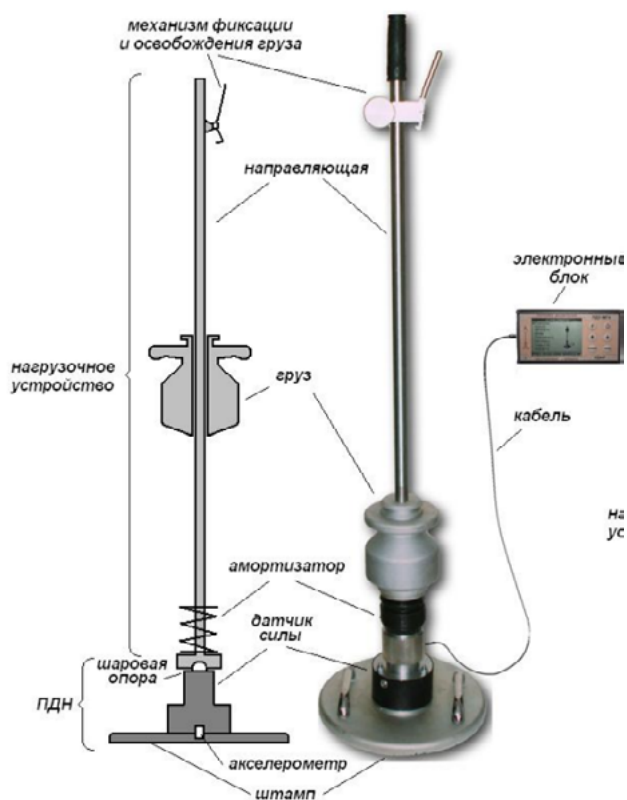


Рис. 1. Измеритель модуля упругости грунтов и оснований дорог ПДУ-МГ4.01 «Удар».

Автор: Д. Н. Сомов

- 2) нагрузочную плиту с ручками для переноски, выполненную из стали диаметром $(200,00 \pm 0,25)$ мм толщиной не менее 20 мм;
- 3) переходный упругий элемент (амортизатор) между нагрузочной плитой и нагрузочным устройством;
- 4) регистрирующее устройство.

Методика измерений

Методика динамического воздействия основана на приложении импульсной нагрузки к поверхности балластного слоя или грунтового основания с последующей регистрацией величины проседания нагружаемого элемента под действием приложенного усилия и вычислением деформационных характеристик. Проведение замеров допускается только при положительных температурах воздуха (выше нуля по Цельсию). Балластный материал и грунты основания не должны иметь признаков промерзания.

Точки для проведения измерений выбирают в произвольном порядке по мере необходимости получения результатов измерений на каждом из подконтрольных участков пути. Измерения производятся в межшпальном пространстве на уровне подошвы шпал.

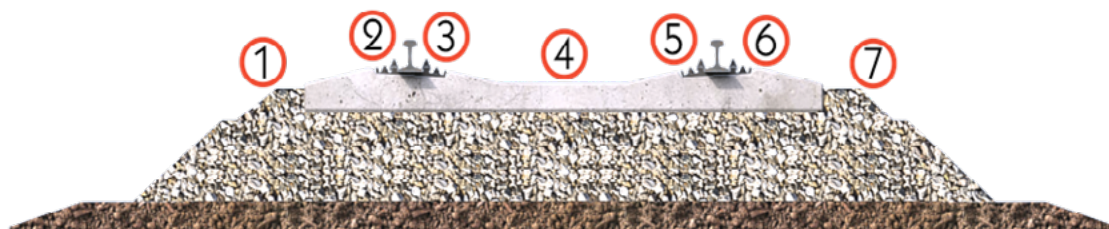


Рис. 2. Места проведения измерений модуля упругости балластной призмы.

Автор: Д. Н. Сомов

В каждом из указанных мест измерений контроль модуля упругости объемного уплотнения балластной призмы проводился в шпальных ящиках в семи местах, указанных на рис. 2:

- на плече балластной призмы по торцам железобетонных шпал по обочине и междупутии — 2 измерения;
- в шпальном ящике снаружи и внутри колеи правого и левого рельса — 4 измерения;
- в шпальном ящике по оси пути — 1 измерение.

Перед началом измерений необходимо провести тщательную подготовку поверхности исследуемого слоя. Участок, где будет размещаться измерительная платформа, следует аккуратно выровнять с использованием ручного инструмента, такого как лопата или грабли, соблюдая осторожность, чтобы не нарушить естественную структуру подстилающих слоев. Особое внимание уделяется плотности прилегания платформы к поверхности — между ними не должно оставаться зазоров. Верхний слой в зоне контакта необходимо очистить от каменных включений размером более 5 см, что проверяется визуальным осмотром.

Для обеспечения идеального прилегания и компенсации возможных неровностей допускается использование сухого песка или мелкофракционного щебня. В этом случае на поверхности создают дополнительную выравнивающую прослойку из щебня мелкой фракции, которая должна повторять контуры основания и немного превышать размеры измерительной платформы. Прослойку тщательно уплотняют, не допуская нарушения целостности основного слоя, а количество выравнивающего материала используют минимально — ровно столько, чтобы заполнить имеющиеся неровности.

После завершения подготовительных работ измерительную платформу устанавливают на поверхность. Для достижения максимального прилегания и горизонтального положения допускается легкое притирание или осторожное постукивание по платформе. Затем монтируют измерительную систему, включающую штатив с ударным механизмом и подключаемый электронный блок, который фиксирует необходимые параметры. Все операции выполняются аккуратно, чтобы не сместить платформу и не исказить результаты измерений.

Выполнение измерений проводят в следующей последовательности в каждом месте измерения:

- 1) в шпальном ящике и по торцам шпал подготавливаются места установки прибора;
- 2) выполняют предварительное нагружение тремя сбросами груза без регистрации деформаций для устранения возможных случайных деформаций;
- 3) выполняют три сбрасывания груза с регистрацией деформации при каждом сбрасывании на блоке управления и в журнале результатов работ.

Модуль упругости определены по результатам проведенных измерений для каждой технологической цепочки выправки пути. На ОАО «РЖД» такие замеры по плотности балластной призмы не проводились.

Технологии выправки пути

Существующая технология выправки пути (РС) (рис. 3):

1 этап по старогодным бесстыковым плетям:

ЩОМ-2000 — ВПО-С — ХДВ — Dynamik 09-3X (двух-трехкратный обжим) — РБП;

2 этап по уложенным и сваренным рельсовым плетям:

ХДВ — Dynamik 09-3X — РБП.

Технология объемного уплотнения балласта (РС) (рис. 4):

По уложенным и сваренным рельсовым плетям:

ЩОМ-2000 — ВПО-С — ХДВ — МПВ 1 секция + МПВ 2 секция.

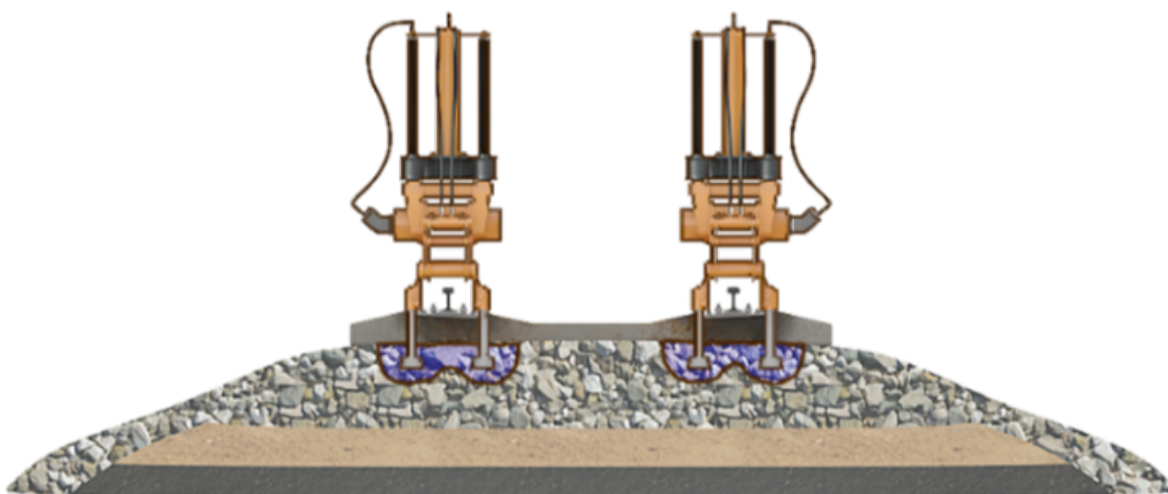


Рис. 3. Подбивочные блоки Dynamik 09-3X (существующая технология).

Автор: Д. Н. Сомов

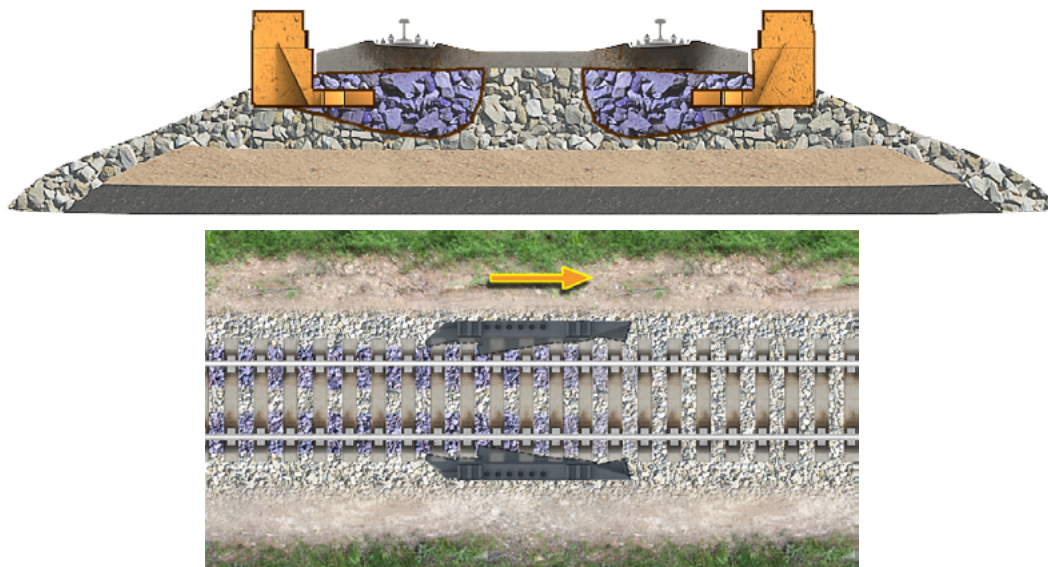


Рис. 4. Технология объемного уплотнения балласта на МПВ. Автор: Д. Н. Сомов

Проведение измерений

Замеры модуля упругости объемного уплотнения балласта проводились на участке капитального ремонта 3-го уровня (1-й путь участка Беклемишево — Рязанцево — Шушково) в 2024 г. Измерения выполнялись:

- до начала ремонтных работ;
- после выправки пути каждой выправочной машиной;
- по завершении работ как по существующей технологии, так и по технологии объемного уплотнения балластной призмы».

Грузонапряженность 1-го пути составляет 73,34 млн т брутто в год. Пропущенный тоннаж участка — 912,84 млн т брутто/км. Проведены замеры в 47 местах на 7 участках. Всего было проведено 332 замера. Время проведения одного замера при предварительно подготовленной площадке в шпальном ящике на уровне подошвы шпал составляет 4 мин.

Результаты измерений

Значение модуля упругости определяется из выражения (1)

$$E = \frac{\pi \cdot d \cdot \sigma}{4L} (1 - \mu^2), \quad (1)$$

где L — амплитуда перемещения, м;

μ — коэффициент Пуассона;

d — диаметр нагружаемого штампа, м;

σ — значение контактного напряжения, рассчитанное по формуле (2)

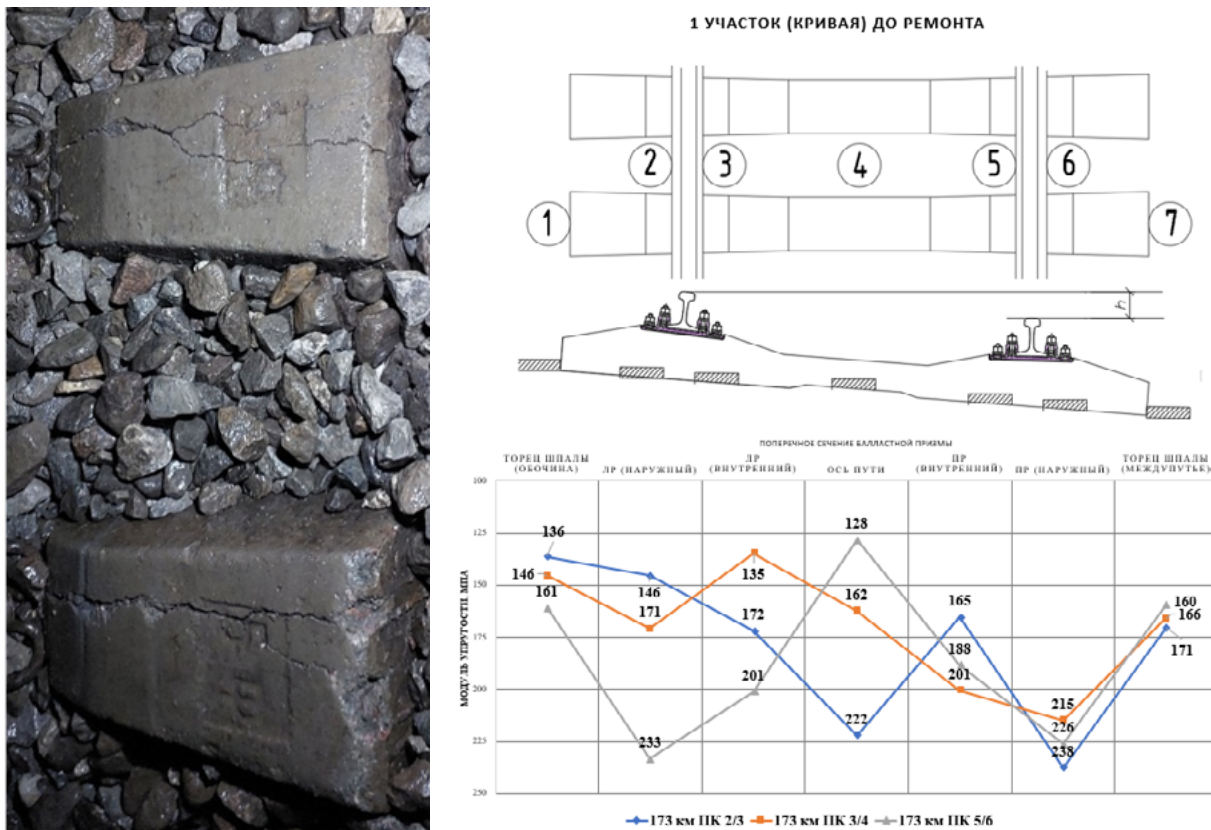


Рис. 5. Анализ объемного уплотнения в круговой кривой 173 км (правая) по состоянию до ремонта пути, в МПа. Автор: Д. Н. Сомов

$$\sigma = \frac{4F}{\pi \cdot d^2}, \quad (2)$$

где F — сила удара, Н.

В процессе текущего содержания пути в круговой кривой при многократных выправках непрерывно-циклическими машинами произошло значительное уплотнение балластной призмы. Достигнутые показатели составили 215–238 МПа, что привело к потере дренирующих и упругих свойств балластной призмы. Это, в свою очередь, стало причиной разрушения верхнего строения пути (рис. 5).

В ходе объемного уплотнения балластной призмы на той же кривой машина ВПО-С работала вслед за щебнеочистительной машиной ЩОМ-2000 с объемным уплотнением первого слоя балластной призмы. Модуль упругости подшпального основания составил примерно 100 МПа (рис. 6).

Машина МПВ работала вслед за хоппер-дозаторной вертушкой с объемным уплотнением второго слоя балластной призмы. Модуль упругости подшпального основания составил примерно 120 МПа (рис. 7).

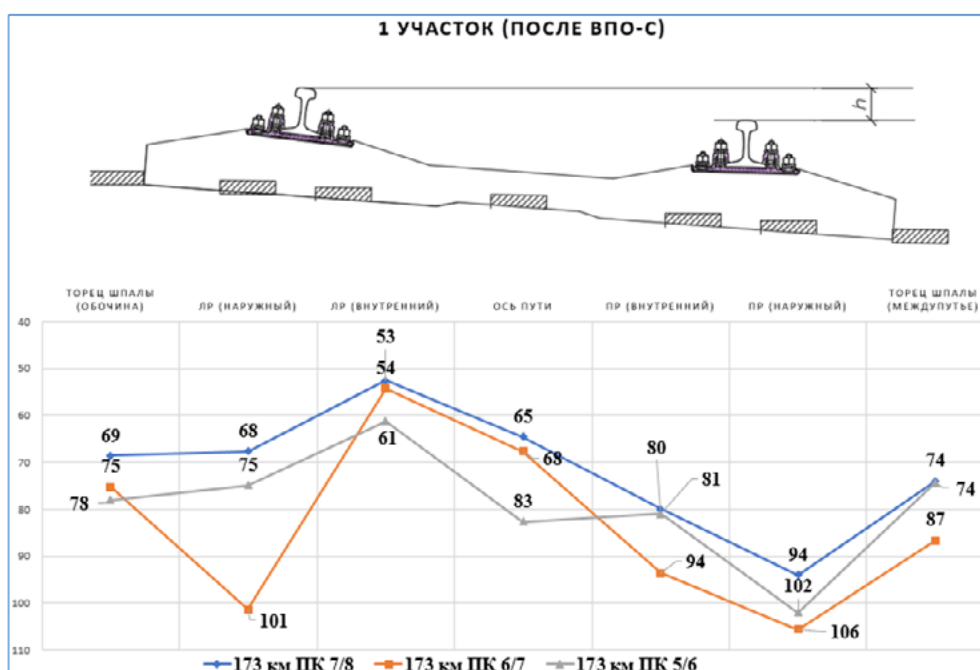


Рис. 6. Результаты объемного уплотнения балластной призмы участка пути в круговой кривой 173 км после выправки пути машиной ВПО-С, в МПа.
Автор: Д. Н. Сомов

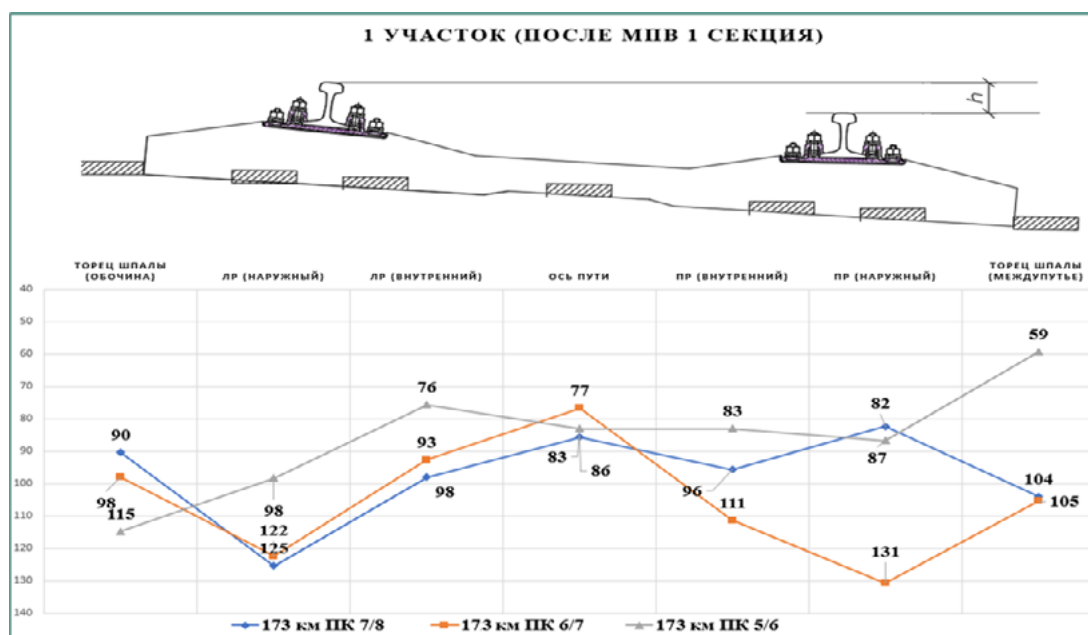


Рис. 7. Результаты объемного уплотнения подшпального основания балластной призмы в круговой кривой 173 км после выправки пути машиной МПВ 1 секция, в МПа. Автор: Д. Н. Сомов

Машина МПВ (2-я секция) работала динамическим стабилизатором по стабилизации балластной призмы вслед за МПВ (1-й секцией). Модуль упругости подшпального основания балластной призмы увеличился до 150 МПа (рис. 8).

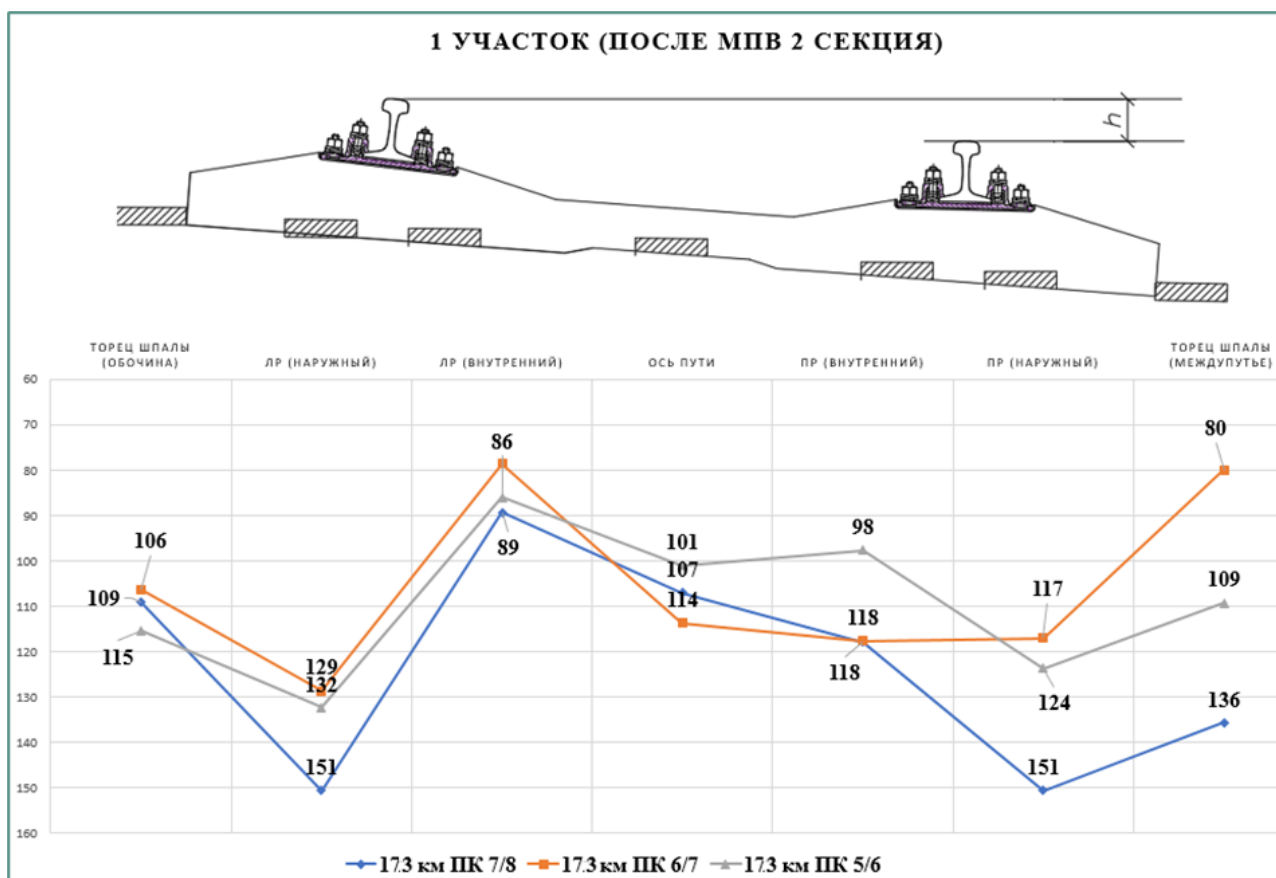


Рис. 8. Результаты объемного уплотнения подшпального основания балластной призмы в круговой кривой (173 км) после выправки пути машиной МПВ (2-я секция), МПа. Автор: Д. Н. Сомов

Выполненные измерения объемного уплотнения подрельсового основания балластной призмы на перегоне Беклемишево — Рязанцево в круговой кривой (173 км) после выправки и стабилизации пути машиной МПВ показали среднее значение модуля упругости 130 МПа. Уплотнение балластной призмы, измеренное до ремонта пути, составляет в основном более 180 МПа (рис. 9).

Обратимся к измерениям в круговой кривой (171 км) перегона Беклемишево — Рязанцево перед ремонтом пути.

В процессе текущего содержания пути при многократных выправках непрерывно-циклическими машинами типа ДМ-09-32 уплотнение балластной призмы достигло значительных величин, превышающих 250 МПа. При таких показателях балластная призма теряет свои дренирующие и упругие свойства, что приводит к разрушению верхнего строения пути (рис. 10).

Итоговые значения модуля упругости объемного уплотнения балластной призмы в круговой кривой (165 км) перегона Беклемишево — Рязанцево после выправки пути машиной МПВ (2-я секция) составили около 130 МПа (рис. 11).

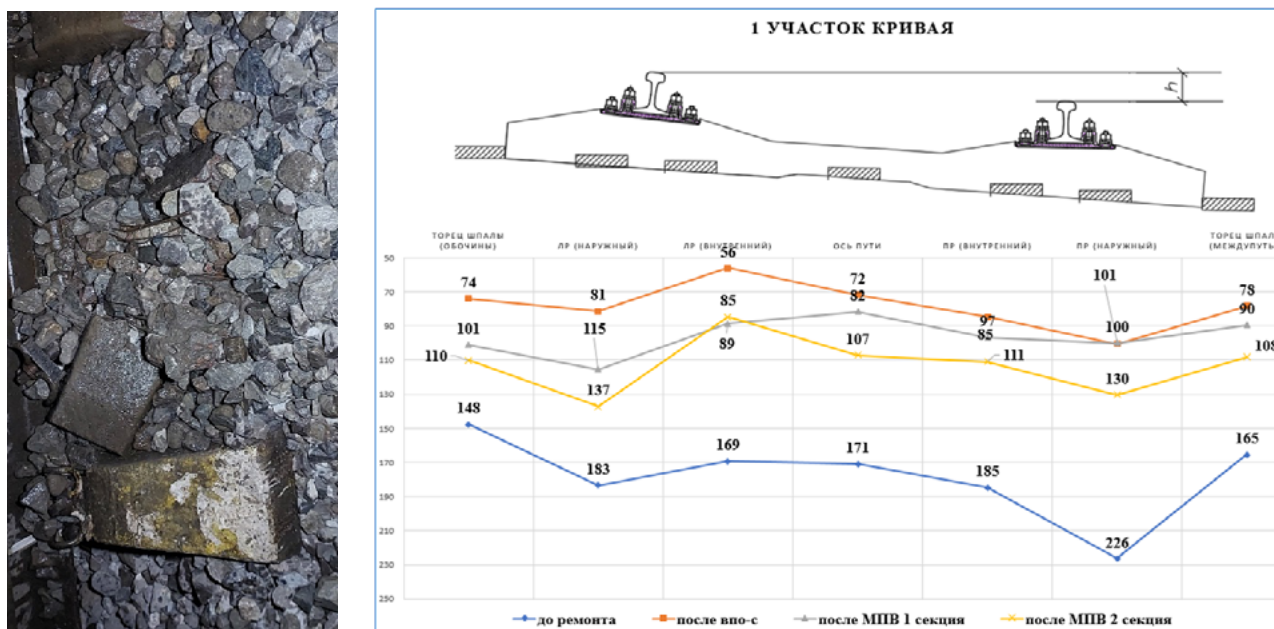


Рис. 9. Итоговые значения модуля упругости по кривой 173 км, МПа.

Автор: Д. Н. Сомов

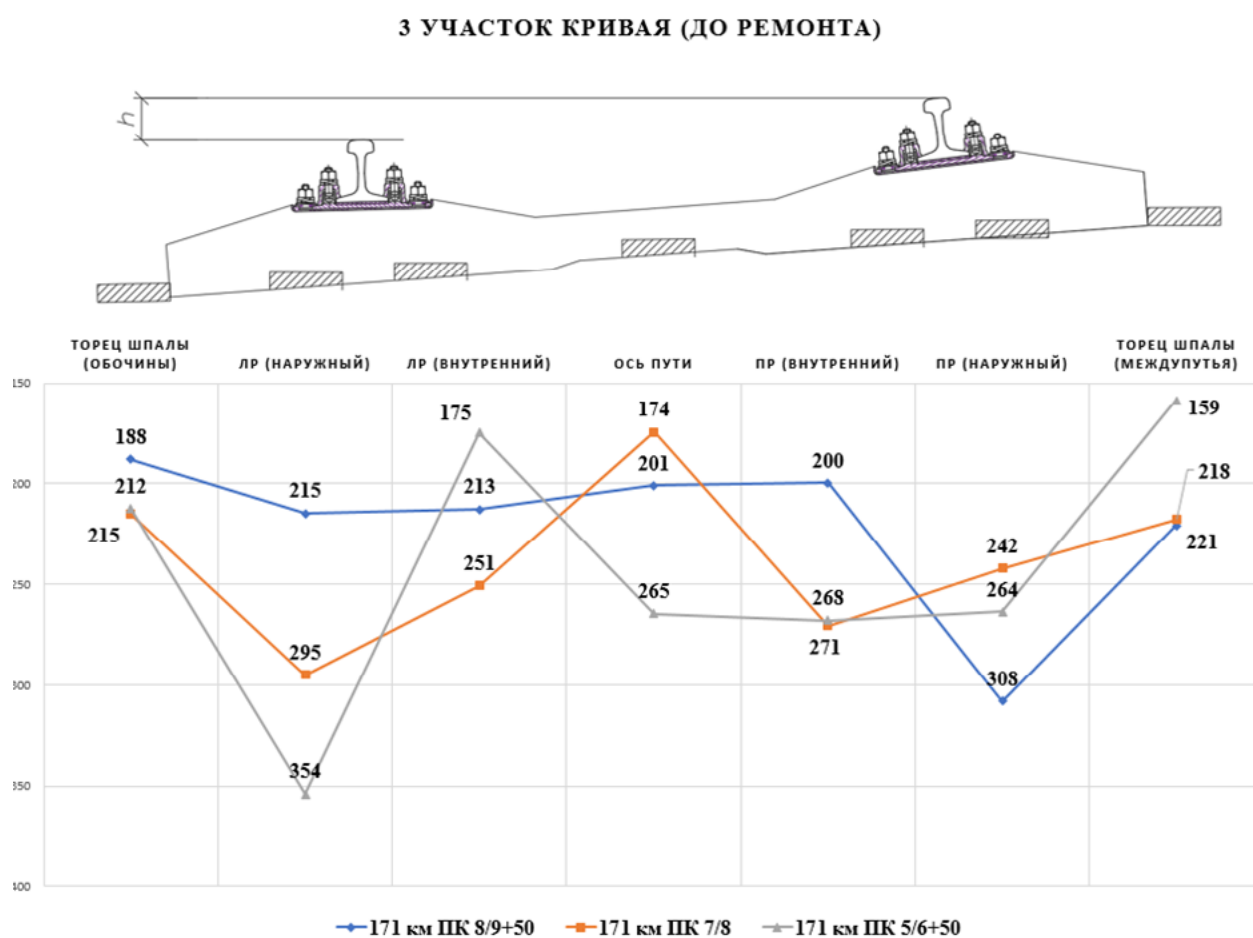


Рис. 10. Анализ объемного уплотнения в левой круговой кривой (171 км) по состоянию до ремонта пути, МПа. Автор: Д. Н. Сомов

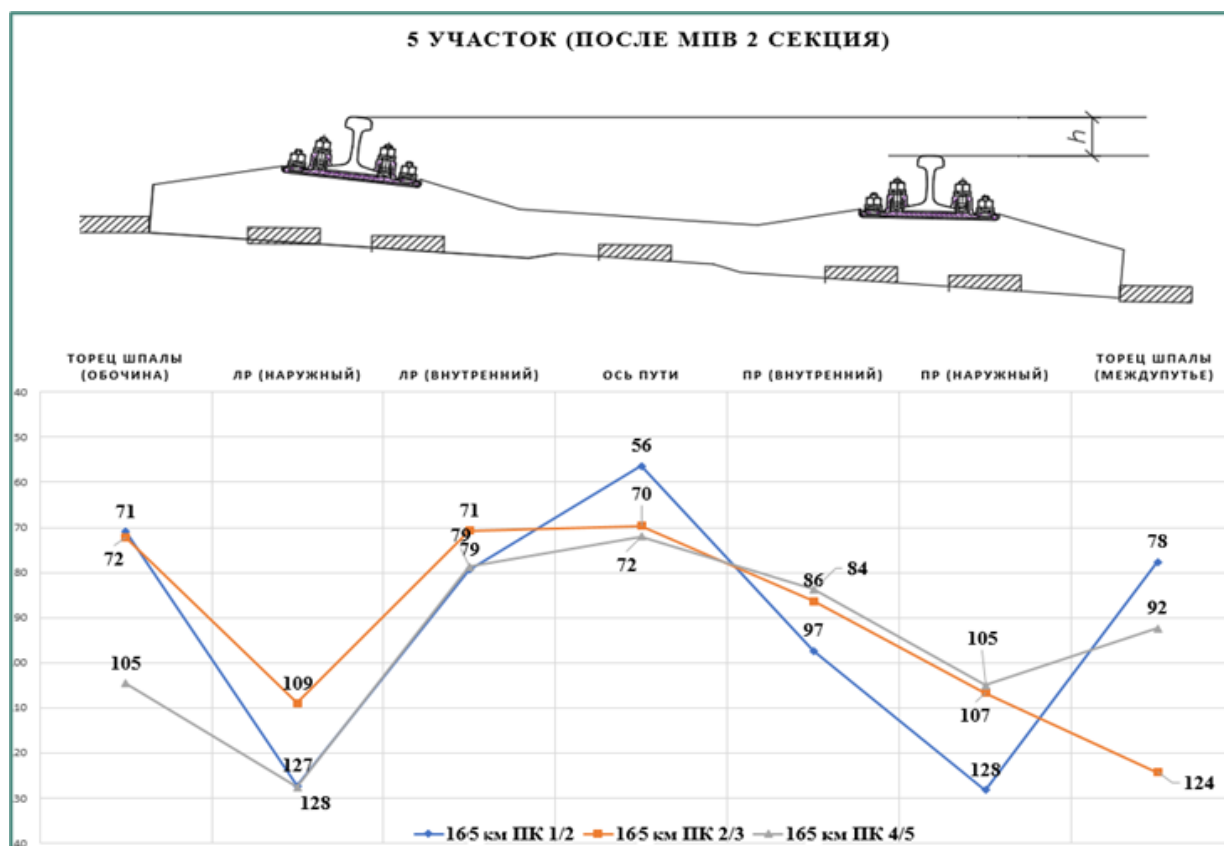


Рис. 11. Результаты средних значений объемного уплотнения балластной призмы в круговой кривой (165 км) после выправки пути машиной МПВ (2-я секция), МПа. Автор: Д. Н. Сомов

Выполненные измерения объемного уплотнения подшпального основания балластной призмы 1-го пути перегона Рязанцево — Шушково в левой круговой кривой после выправки пути машиной Dynamik 09-3X (с двух-трехкратным обжимом и динамической стабилизацией пути) показали модуль упругости 100–130 МПа (рис. 12).

Выводы

По результатам проведенной научно-исследовательской работы по измерению величин модуля упругости участков до выполнения работ и отремонтированных по существующей и технологии объемного уплотнения балластной призмы после выполнения работ в объеме среднего ремонта пути можно сделать следующие основные выводы:

1. Состояние пути всех измеренных участков по данным вагона-путеизмерителя оценивается как «хорошее» и «отличное».
2. Результаты проведенных измерений модуля упругости балластной призмы на разных этапах ее жизненного цикла подтвердили версию об отсутствии равномерного уплотнения щебеночного балласта в подшпальном основании.

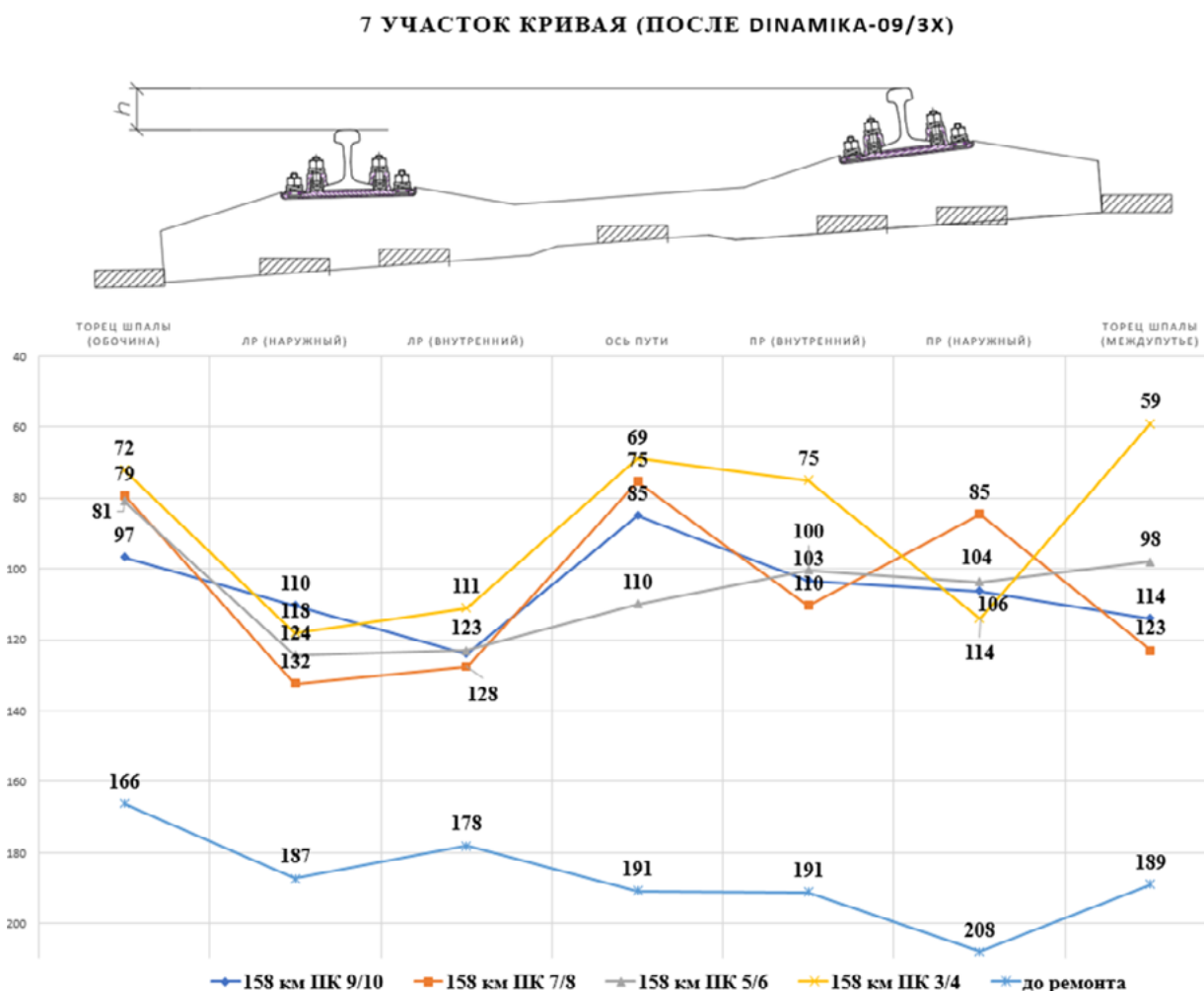


Рис. 12. Анализ объемного уплотнения балластной призмы 1-го пути перегона Рязанцево — Шушково (158 км) в левой кривой по состоянию после работы Dynamik 09-3X, Мпа. Автор: Сомов Д. Н.

3. Измеренная величина модуля упругости подшпального основания балластной призмы перегонов Беклемишево — Рязанцево — Шушково при пропущенном тоннаже более 900 млн т брутто/км в прямом участке составила в диапазоне 200–245 МПа, а в кривых участках пути — в диапазоне от 200 до 350 МПа. Это является чрезмерным уплотнением балластной призмы, при котором щебеночный балласт полностью теряет свои упругие свойства. В результате элементы верхнего строения пути начинают работать с перенапряжением и выходят из строя.

4. Применение последовательной технологии обработки пути с использованием выправочно-подбивочных машин ВПО-С и комплекса МПВ позволяет достичь требуемых параметров стабилизации балластной призмы без необходимости дополнительного привлечения специализированных машин динамической стабилизации. В процессе работ первая секция МПВ осуществляет объемное уплотнение балласта, тогда как вторая секция обеспечивает динамическую стабилизацию пути, что в совокупности дает необходимый эффект уплотнения.

5. Особый интерес представляют результаты измерений модуля упругости на участках, отремонтированных по технологии капитального ремонта 3-го уровня. Как показывают исследования, показатели упругости балластного слоя, обработанного однократным проходом машин непрерывного действия ВПО-С в комплексе с МПВ, оказываются не ниже, а в некоторых случаях даже превышают аналогичные параметры при использовании традиционных методов с многократной (двойной-тройной) подбивкой шпал машинами циклического действия типа Dynamik-09-3X.

Будущие исследования

Проведенные замеры упругих характеристик балластного слоя во время технологических «окон» после выполнения среднего ремонта пути с применением как традиционных, так и новых технологических решений (при полученных значениях модуля упругости в диапазоне 100–130 МПа) указывают на необходимость дальнейших комплексных исследований.

Для всестороннего понимания процессов стабилизации балластной призмы в реальных эксплуатационных условиях требуется организация долгосрочного мониторинга, охватывающего период от момента ввода отремонтированного участка в эксплуатацию до истечения гарантийного срока службы.

Особое внимание в ходе предстоящих исследований следует уделить сравнительному анализу эффективности инновационных и традиционных технологий ремонта при различных условиях эксплуатации и в различные временные периоды. Важнейшей задачей является разработка усовершенствованных методов выправки пути, которые позволят не только сохранить, но и оптимизировать ключевые эксплуатационные характеристики щебеночного балласта — его упругие свойства и дренажную способность. Решение этой задачи напрямую связано с перспективой значительного увеличения ресурса верхнего строения пути и снижением эксплуатационных затрат на его содержание.

Проведение таких исследований позволит получить принципиально новые данные о закономерностях изменения состояния балластного слоя в процессе эксплуатации и разработать научно обоснованные рекомендации по совершенствованию технологий ремонта железнодорожного пути.

Список источников

1. Сазонова С. А. Применение экспресс-методов для определения характеристик насыпных грунтов / С. А. Сазонова, С. Д. Румянцев // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. — 2017. — Т. 8. — № 3. — С. 113–120. — DOI: 10.15593/2224-9826/2017.3.13.

2. Комаров Д. А. Определение деформационных характеристик армогрунтового основания экспресс-методом с помощью динамического плотномера / Д. А. Комаров, В. И. Клевеко // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. — 2019. — Т. 10, № 4. — С. 5–12. — DOI: 10.15593/2224-9826/2019.4.01.
3. Борецкий А. Разработка и внедрение новых технологий ремонта пути с применением Универсального путевого комплекса / А. Борецкий // Гудок. — 2021. — № 13. — URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1551112> (дата обращения: 08.02.2024).
4. ГОСТ Р 59866—2022. Национальный стандарт Российской Федерации. Дороги автомобильные общего пользования. Показатели деформативности конструктивных слоев дорожной одежды из несвязных материалов и грунтов земляного полотна. Технические требования и методы определения. — Введ. 2022-04-01. — М.: Стандартинформ, 2022. — 39 с.
5. Болдырев Г. Г. Методы определения механических свойств грунтов с комментариями к ГОСТ 12248-2010: монография / Г. Г. Болдырев. — 2-е изд., доп. и испр. — М.: ООО «Прондо», 2014. — 812 с.
6. Болдырев Г. Г. Механика грунтов. Основания и фундаменты (в вопросах и ответах): учеб. пособие / Г. Г. Болдырев, М. В. Малышев. — 4-е изд., перераб. и доп. — Пенза: ПГУАС, 2009. — 412 с.
7. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83. — Введ. 2017-06-01. — М.: Минстрой России, 2016. — 156 с.

Дата поступления: 14.06.2025

Решение о публикации: 12.08.2025

Контактная информация:

СОМОВ Даниил Николаевич — аспирант, инженер кафедры «Строительство дорог транспортного комплекса»; somovdaniil2000@gmail.com

ПЕТРЯЕВ Андрей Владимирович — д-р техн. наук, ст. науч. сотр. кафедры «Строительство дорог транспортного комплекса»; pgups60@mail.ru

ПАРАХНЕНКО Инна Леонидовна — канд. техн. наук, доц. кафедры «Путь и железнодорожное строительство»; Iparahnenko@usurt.ru

ТЕНИРЯДКО Надежда Ивановна — канд. техн. наук, доц. кафедры «Автомобильные дороги, аэродромы, основания и фундаменты»; nad1010@inbox.ru

A Comparative Analysis of the Elastic Modulus of the Ballast Prism When Using Volumetric Compaction Technologies and Traditional Methods of Track Straightening in Medium-Scale Railway Track Repair Conditions

D. N. Somov¹, A. V. Petriaev¹, I. L. Parakhnenko², N. I. Teniryadko³

¹Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²Ural State University of Railway Transport, 66, Kolmogorova str., Ekaterinburg, 620034, Russian Federation,

³Russian University of Transport, 9, bld. 9, Obraztsova str., Moscow, 127994, Russian Federation

For Citation: Somov D. N., Petriaev A. V., Parakhnenko I. L., Teniryadko N. I. A Comparative Analysis of the Elastic Modulus of the Ballast Prism When Using Volumetric Compaction Technologies and Traditional Methods of Track Straightening in the Medium-Scale Railway Track Repair Conditions. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 3, pp. 107–123. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-107-123

Summary

Purpose: To determine the elasticity modulus of the ballast prism and its unevenness in sections straightened by the method of volumetric ballast compaction, using a string of continuous-action track machines (CTM-C and PSM), and the ballast prism levelled with the standard technology, using continuous and continuous-cyclic machines (CTM-C + Dynamic 09-3X), in a full cycle of standard track repair (TR). **Methods:** The measurements were obtained with the sleeper box removed to the bottom of the sleepers. The PDU-MG4.01 'Udar' dynamic soil density meter was employed for this purpose, and the most suitable location for stamp installation was selected. A total of seven measurements were obtained for each cross-section of the ballast prism. **Results:** It has been determined that the modulus of elasticity of the track ballast prism by the method of volumetric compaction repaired as part of level-3 track overhaul and straightened by a single pass of continuous-action machines CTM-C and PSM complex, is not lower than that of the track ballast prism of sections straightened by a single pass of the Dynamic 09-3X continuous-cyclic machine performing standard double-triple piling of sleepers. The technology under discussion provides the required parameters of ballast prism track stabilization without the need for additional DSM dynamic stabilization machines. Following the implementation of the technology in question, it is anticipated that the condition of the track will permit the movement of trains at design speeds. Furthermore, it is expected that the implementation will provide throughput capacity for the section. **Practical significance:** The following amendments have been made to the regulatory documentation in order to establish a regulatory framework that accounts for the elasticity and deformation modulus of the ballast prism during track repair work performed by various machines. The framework must include provisions for the volumetric compaction of the ballast prism, the state of compaction, modulus of elasticity and modulus of deformation of the ballast prism and the main subgrade area, and so forth. In the course of further research, it will be necessary to develop track-straightening technologies that preserve the elastic and draining properties of crushed stone ballast and increase the life cycle of the track superstructure.

Keywords: Modulus of elasticity, crushed stone, track renewal machines/trains, ballast prism, sleeper box.

References

1. Sazonova S. A., Rumyantsev S. D. Primenenie ekspress-metodov dlya opredeleniya kharakteristik nasypnykh gruntov [Application of express methods for determining the characteristics of bulk soils]. *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of PNIPU. Construction and Architecture]. 2017, vol. 8, Iss. 3, pp. 113–120. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.3.13. (In Russian)

2. Komarov D. A., Kleveko V. I. *Opredelenie deformatsionnykh kharakteristik armogruntovo-go osnovaniya ekspress-metodom s pomoshch'yu dinamicheskogo plotnomera* [Determination of deformation characteristics of reinforced soil base by express method using dynamic densitometer]. *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of PNIPU. Construction and Architecture]. 2019, vol. 10, Iss. 4, pp. 5–12. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.4.01. (In Russian)
3. Boretskiy A. *Razrabotka i vnedrenie novykh tekhnologiy remonta puti s primeneniem Universal'nogo putevogo kompleksa* [Development and implementation of new track repair technologies using the Universal track complex]. *Gudok*, 2021, Iss. 13. Available at: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1551112> (accessed: February 8, 2024). (In Russian)
4. *GOST R 59866—2022. Natsional'nyy standart Rossiyskoy Federatsii. Dorogi avtomobil'nye obshchego pol'zovaniya. Pokazateli deformativnosti konstruktivnykh sloev dorozhnoy odezhdy iz nesvyaznykh materialov i gruntov zemlyanogo polotna. Tekhnicheskie trebovaniya i metody opredeleniya* [GOST R 59866—2022. National Standard of the Russian Federation. Public roads. Indicators of deformability of structural layers of road pavement made of unbound materials and subgrade soils. Technical requirements and determination methods]. Introd. 2022-04-01. Moscow: Standartinform Publ., 2022. 39 p. (In Russian)
5. Boldyrev G. G. *Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoystv gruntov s kommentariyami k GOST 12248—2010, 2-e izd., dop. i ispr.* [Methods for determining mechanical properties of soils with comments to GOST 12248—2010: monograph, 2nd ed., rev. and corr.]. Moscow: OOO “Prondo” Publ., 2014, 812 p. (In Russian)
6. Boldyrev G. G., Malyshev M. V. *Mekhanika gruntov. Osnovaniya i fundamenty (v voprosakh i otvetakh): ucheb. posobie, 4-e izd., pererab. i dop.* [Soil mechanics. Foundations and footings (in questions and answers): textbook, 4th ed., rev. and corr.]. Penza: PGUAS Publ., 2009. 412 p. (In Russian)
7. *SP 22.13330.2016. Osnovaniya zdaniy i sooruzheniy. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 2.02.01-83* [SP 22.13330.2016. Foundations of buildings and structures. Updated edition of SNIp 2.02.01-83]. Introd. 2017-06-01. Moscow: Minstroy Rossii Publ., 2016, 156 p. (In Russian)

Received: June 14, 2025

Accepted: August 12, 2025

Author's information:

Daniil N. SOMOV — Postgraduate Student, Engineer, Department “Road Construction of Transport Systems”; somovdaniil2000@gmail.com

Andrey V. PETRYAEV — Dr. Sci. in Engineering, Senior Research Fellow, Department “Road Construction of Transport Systems”; pgups60@mail.ru

Inna L. PARAKHNENKO — PhD in Engineering, Associate Professor, Department “Track and Railway Construction”; Iparahnenko@usurt.ru

Nadezhda I. TENIRYADKO — PhD in Engineering, Associate Professor, Department “Highways, airfields, bases and foundations”; nad1010@inbox.ru

УДК 625.12

Расчет осадки оттаивающих многолетнемерзлых грунтов земляного полотна при действии динамической нагрузки

А. В. Святогорова¹, И. В. Колос¹, Д. Р. Кузнецова¹, Т. Ю. Вальцева²

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

²Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 680021, Хабаровск, ул. Серышева, 47

Для цитирования: Святогорова А. В., Колос И. В., Кузнецова Д. Р., Вальцева Т. Ю. Расчет осадки оттаивающих многолетнемерзлых грунтов земляного полотна при действии динамической нагрузки // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 3. — С. 124–134. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-124-134

Аннотация

Цель: Разработка методики расчета осадки оттаивающих многолетнемерзлых грунтов земляного полотна железнодорожных путей под действием динамических нагрузок. Проведение сравнительного анализа результатов расчета осадок при воздействии динамической нагрузки с результатами традиционных расчетов, основанных на статическом подходе. **Метод:** Исходные параметры для выполнения расчетов осадки были определены экспериментальным путем посредством лабораторных исследований грунтов в установке трехосного сжатия. Для моделирования процесса осадки использовался численный метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в специализированном программном комплексе COMSOL Multiphysics. Данный комплекс позволил учесть особенности взаимодействия сложных геологических условий с динамическими нагрузками, возникающими при движении железнодорожного транспорта. **Результаты:** Выполненный расчет показал, что величина осадки земляного полотна при учете динамического воздействия значительно превосходит осадку, полученную при использовании традиционного статического метода расчета. Это подтверждает важность корректного учета динамических характеристик при оценке устойчивости дорожных насыпей, построенных на многолетнемерзлых грунтах. **Практическая значимость:** Учет динамических нагрузок является критически важным фактором для обеспечения высокой надежности и долговечности строительных конструкций на участках с оттаивающим мерзлым грунтом. Применение предложенной методики позволяет точно предсказывать возможные деформации и осадки грунтовых оснований, что, в свою очередь, помогает избежать преждевременных разрушений и аварийных ситуаций. Таким образом, данная работа имеет высокую практическую ценность для повышения уровня безопасности и эффективности строительства и эксплуатации железнодорожных магистралей в зонах распространения многолетней мерзлоты.

Ключевые слова: Осадка, железнодорожный транспорт, оттаивающие грунты, земляное полотно, динамические нагрузки, многолетнемерзлые грунты.

Введение

В условиях глобального потепления таяние вечной мерзлоты становится все более актуальной проблемой. Оттаивание верхнего слоя приводит к тому, что грунт теряет свою несущую способность и деформационные свойства, что вызывает разрушение железнодорожных конструкций. Даже небольшие изменения температуры могут привести к значительным деформациям [1].

Одним из важных параметров в расчетах показателей деформируемости грунтов земляного полотна является динамический модуль деформации (E_d), который описывает свойства материала в условиях динамического нагружения. Учет динамического модуля деформации существенно влияет на расчет осадки земляного полотна, особенно когда речь идет о дорожных конструкциях, испытывающих постоянные нагрузки, таких как железные и автомобильные дороги. Данный модуль учитывает поведение грунта при циклических нагрузках, таких как воздействие движущегося транспорта. В отличие от статической нагрузки, где учитываются лишь мгновенные реакции грунта, динамическая нагрузка вызывает накопление деформаций, связанных с повторяемостью воздействий.

Динамический модуль деформации является более полным и точным показателем для оценки поведения грунта при различных видах нагрузок, включая динамические воздействия. Это делает его важным параметром при проектировании и строительстве инженерных сооружений [2].

Учет динамики при расчете осадки земляного полотна позволяет более точно оценить устойчивость конструкций к внешним воздействиям, особенно в зонах с высокой сейсмической активностью или вблизи источников вибраций.

Актуальность темы исследования также подчеркивается в программе развития ОАО «РЖД», согласно которой в последние годы отмечается увеличение масштабов строительства железных дорог в Арктике, несмотря на негативные последствия глобального потепления для многолетнемерзлых грунтов. Это требует обеспечения устойчивости земляного полотна и его основания к деформациям в условиях оттаивания грунтов в регионах с распространением многолетней мерзлоты [3].

Лабораторные испытания

Определение статического и динамического модуля деформации проводится в лаборатории с помощью прибора трехосного сжатия [4]. Данный прибор позволяет проводить испытания в статическом и динамическом режиме. Схема прибора представлена на рис. 1.

Этапы проведения лабораторных испытаний следующие [5, 6]:

1. Подготовка образца грунта к испытанию:

- Изготавливается образец грунта нарушенной структуры размером 50×100 мм с помощью разъемного кольца.
- Образец отправляется в морозильную камеру не менее чем на 12 часов для создания условий оттаивающего многолетнемерзлого грунта.
- Непосредственно перед испытанием измеряется температура грунта и заносится в ведомость результатов испытания.

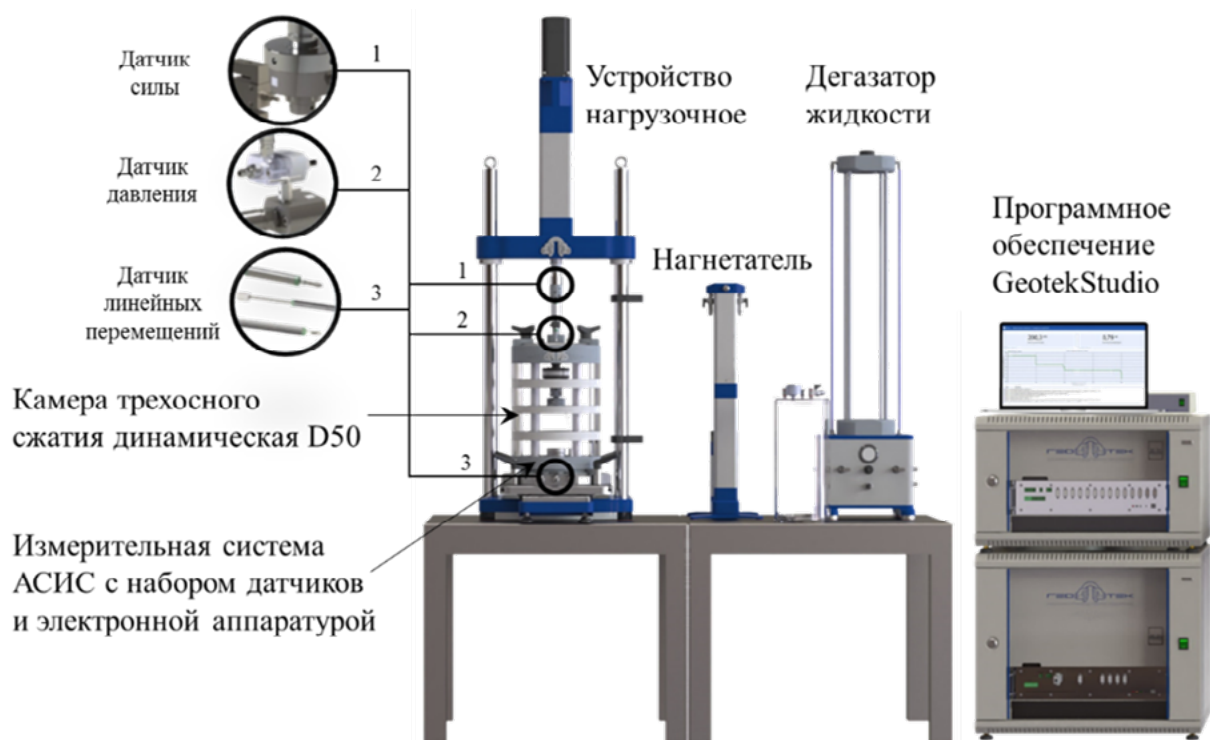


Рис. 1. Прибор трехосного сжатия

2. Подготовка лабораторного оборудования:

- Проверка оборудования на работоспособность.
- Подключение программного обеспечения.
- Заливка дистиллированной воды в дегазатор в объеме около 5 литров.

3. Установка образца в камеру:

- На нижний штамп камеры устанавливается пористый диск.
- На диск укладывается фильтрованная бумага.
- Образец грунта с помощью разъемного кольца помещается в оболочку

и устанавливается на штамп.

- На верхний торец образца укладывается фильтрованная бумага.

– Перед подачей воды необходимо закрыть камеру стойкой, закрутить винты и установить датчики перемещений.

4. Подача воды в камеру из дегазатора.

5. Работа с ПО Geotek Studio:

- С помощью программного обеспечения Geotek Studio задаются параметры для проведения испытаний.

Во время статических испытаний нагрузочное устройство постоянно воздействует на образец, постепенно увеличивая силу воздействия. В случае же динамических испытаний нагрузочное устройство задает определенную нагрузку, резко ее сбрасывает, затем задает еще большую нагрузку, и так продолжается до момента разрушения образца. Разрушение образца происходит при достижении деформации, составляющей 20 % от его первоначальной высоты.

В данном исследовании для расчета деформаций использовалась твердая супесь плотностью $\rho = 1,91 \text{ г/см}^3$. Характеристики испытания представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Параметры, необходимые для расчета

№ исп.	Температура, T	Влажность, ω , %	Главное напряжение, σ_3	Главное напряжение, σ_1	Частота нагружения f , Гц
1	–1	9,2	10	10	1,0
2	–1	10	15	50	2,0
3	–0,5	12	20	100	3,0
4	–0,5	14,3	30	200	4,0

Обработка результатов

На основании результатов испытаний были получены графики зависимости осевого напряжения (кПа) от осевой деформации. Один из результатов испытания представлен на рис. 2.

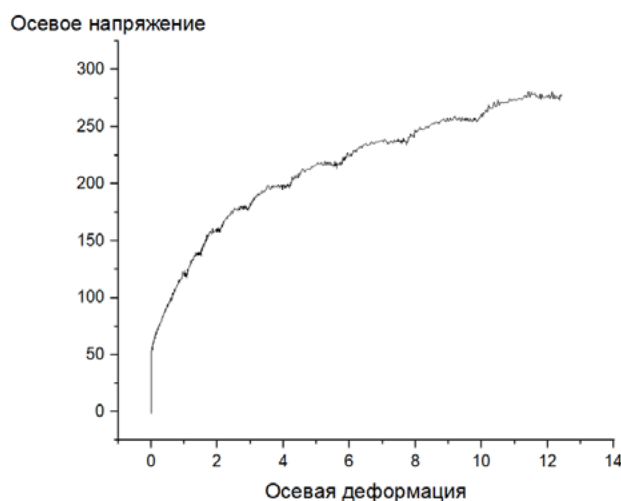


Рис. 2. К определению модуля деформации

В соответствии с ГОСТ 56353—2015 [7] и ГОСТ 12248—2010 были определены значения статического и динамического модулей деформации по формулам (1) и (2):

Модуль деформации в условиях динамического нагружения:

$$E_d = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_{\max}}, \quad (1)$$

где σ — осевое напряжение, кПа;
 ε — осевая деформация, %.

Модуль деформации в условиях статического нагружения:

$$E_d = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}, \quad (2)$$

где σ — осевое напряжение, кПа;

ε — осевая деформация, %

По результатам статических и динамических испытаний были получены следующие усредненные значения деформаций:

$$E_s \sim 228 \text{ кгс/см}^2 = 22,8 \text{ Мпа};$$

$$E_d \sim 30,4 \text{ Мпа}.$$

Согласно данным лабораторных испытаний, значение динамического модуля деформации на 35 % выше показателя статического модуля.

Расчет параметров с помощью МКЭ

В рамках расчета принята конструкция железнодорожной насыпи высотой 3,5 м с поперечным уклоном 1:1,5, схема представлена на рис. 3. Начальные параметры грунтов представлены в табл. 2.

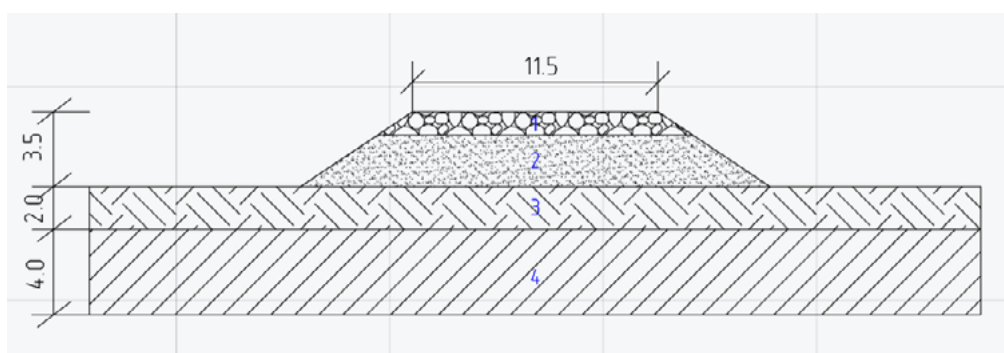


Рис. 3. Схема насыпи для расчета

ТАБЛИЦА 2. Начальные параметры материалов земляного полотна

Слой	ρ / (кг/м ³)	ω_0 / (%)	T_n / (°C)
1 — гравий	1950	6	–3,2
2 — крупный песок	1900	6	–2,8
3 — песчанистая твердая супесь (сезонно-талый слой)	1800	12	–2,1
4 — пылеватая глина	1600	30	–3,1

На основании лабораторных данных с помощью в программном комплексе COMSOL Multiphysics [8] были получены амплитуды динамического перемещения. Верификация результатов амплитуды динамических перемещений проведена на основе показателя затухания амплитуды перемещений δ , определяемого по формуле (3):

$$\delta = \frac{A_z}{A_o}, \quad (3)$$

где A_z — амплитуда на определенной глубине от низа балластной призмы;
 A_o — амплитуда на основной площадке.

Результаты исследования И. В. Прокудина [9] и результаты расчетов в этой работе сравнивались на основе показателя затухания δ при скорости движения поезда 50 км/ч, сравнение показано на рис. 4.

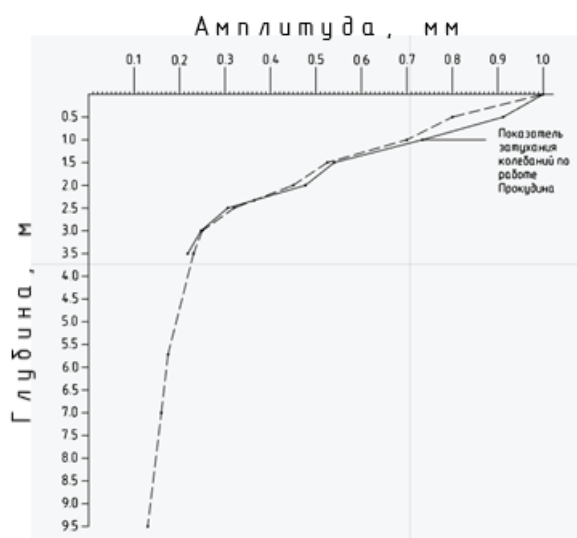


Рис. 4. Сравнение результатов расчетов показателя затухания амплитуды перемещения δ при скорости движения поезда 50 км/ч

Результат сравнения подтверждает достоверность результатов численного моделирования амплитуды динамического перемещения.

Расчет осадки

Динамический модуль деформации для расчета осадки земляного полотна в данной статье определяется по формуле (4):

$$E_d = E_o \left[K'_e + K_e \exp(-K'(A - A'')) \right], \quad (4)$$

где E_d — динамический модуль деформации;
 E_o — модуль деформации, определенный в условиях статических испытаний;
 K'_e — отношение минимального модуля деформации при вибродинамическом воздействии к его значению при статическом нагружении;
 K_e — максимальная величина показателя относительного снижения модуля деформации при вибродинамическом воздействии;
 K' — коэффициент вибродинамического деформирования грунта;

A — амплитуда колебаний при определенном модуле деформации;
 A'' — начальная амплитуда, вызывающая снижение модуля на 3–5 % [9].
 Значения параметров, необходимых для расчета, представлены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Значения параметров

Параметр	Значение
K'_a	0,35
K_e	0,65
K'	0,007
A''	10

Значения в таблице представлены для твердой супеси.

Для оценки влияния динамического модуля деформации на осадку земляного полотна выполним расчет осадки в следующих условиях:

- 1) осадка от действия собственного веса насыпи с учетом поездной нагрузки в статике;
- 2) осадка от собственного веса насыпи с учетом поездной нагрузки в динамике.

Расчет осадки земляного полотна выполнен методом послойного суммирования по формуле (5):

$$S = \sum_{i=1}^{i=h} \frac{h_i \cdot \sigma_{zi}}{E_i} \beta, \quad (5)$$

где h_i — мощность отдельных слоев грунта;
 E_i — модуль деформации грунта в слоях;
 σ_{zi} — максимальные сжимающие напряжения в них;
 β — коэффициент, зависящий от бокового расширения грунта [10].

Результаты расчета осадки оттаивающих многолетнемерзлых грунтов земляного полотна в зимний период представлены на рис. 5 и 6.

По результатам расчета осадки земляного полотна методом послойного суммирования установлено, что величина осадки под действием динамической нагрузки превышает показатель при статической нагрузке на 30 %.

Заключение

В результате проведенного исследования установлено, что **динамические нагрузки существенно влияют** на величину осадки земляного полотна, сложенного оттаивающими многолетнемерзлыми грунтами. Расчеты показали: осадка под действием динамической нагрузки значительно выше показателей статического

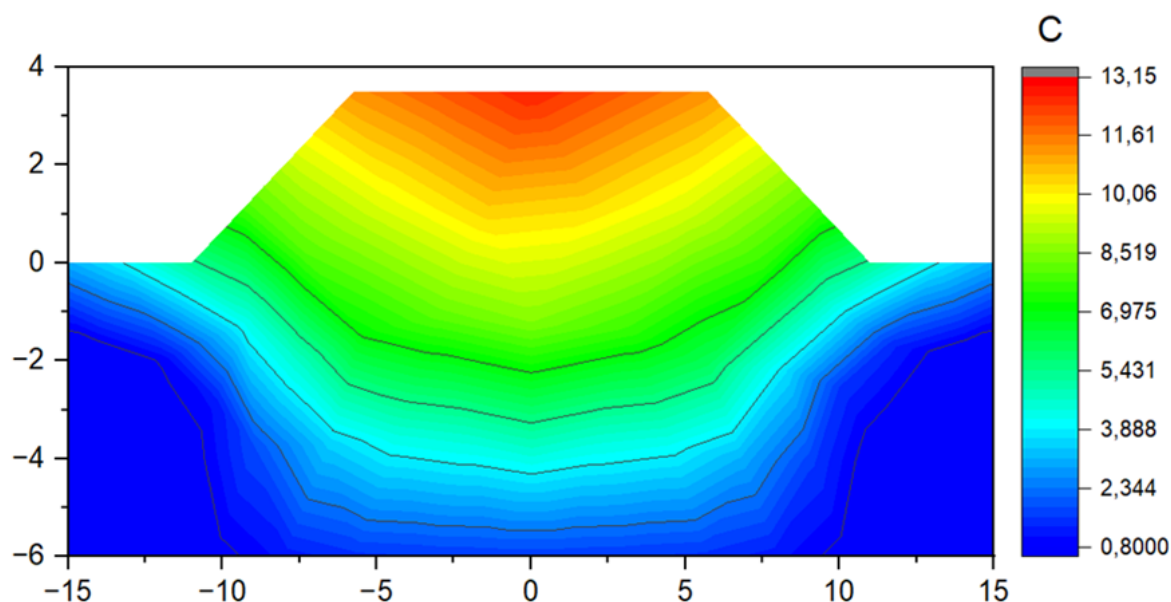


Рис. 5. Осадка земляного полотна под действием статической нагрузки

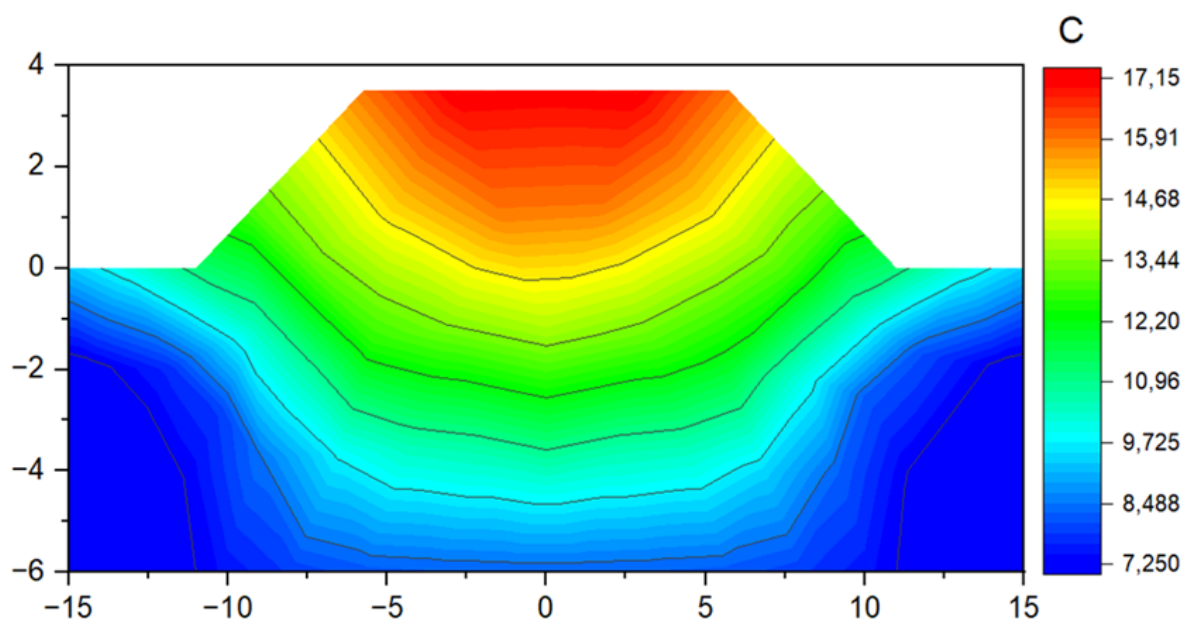


Рис. 6. Осадка земляного полотна с учетом динамической нагрузки

расчета. Это подтверждает необходимость учета динамики нагрузок, особенно при эксплуатации транспортных сооружений на мерзлоте, где изменение свойств грунта при оттаивании может серьезно повлиять на устойчивость конструкции.

Полученные данные подчеркивают важность детальных расчетов с учетом реальных условий работы конструкций в зоне многолетней мерзлоты, включая динамические факторы. Такой подход обеспечит повышение надежности проектируемых объектов и снизит риски деформаций земляного полотна при эксплуатации.

Список источников

1. Юрченко В. А. Вечная мерзлота: геокриологические опасности и региональная деградация мерзлых грунтов / В. А. Юрченко, А. В. Манько // ИВД. — 2023. — № 8(104). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vechnaya-merzlota-geokriologicheskie-opasnosti-i-regionalnaya-degradatsiya-merzlyh-gruntov>.
2. Зайцев А. А. Комплексная методика автоматизированной оценки динамической устойчивости железнодорожных насыпей: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.06 / А. А. Зайцев. — М., 2000. — 255 с.
3. Бушуев Н. С. Особенности проектирования трассы железной дороги в условиях вечной мерзлоты / Н. С. Бушуев, С. В. Шкурников, В. А. Герасимов и др. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2019. — № 3(63). — С. 135–142.
4. ГОСТ 12248—2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.
5. ASTM D1196—93. Standard Test Method for Nonrepetitive Static Plate Load Tests of Soils and Flexible Pavement Components, for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements. — 2004.
6. Методические рекомендации по проведению испытаний в приборе трехосного сжатия автоматизированном ГТ 1.3.5 / ООО НПП ГЕОТЕК.
7. ГОСТ Р 56353—2015. Грунты. Методы лабораторного определения динамических свойств дисперсных грунтов.
8. Сальников В. Б. Теплотехнические расчеты строительных конструкций с применением программного комплекса COMSOL Multiphysics: учеб.-метод. пособие / В. Б. Сальников, В. А. Беляков; под ред. В. Н. Алехина; М-во образования и науки РФ, Урал. федер. ун-т. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. — 48 с.
9. Прокудин И. В. Прочность и деформативность железнодорожного земляного полотна из глинистых грунтов, воспринимающих вибродинамическую нагрузку: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.06 / И. В. Прокудин. — Л., 1982. — 458 с.
10. СП 50-101—2004. Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений.

Дата поступления: 15.06.2025

Решение о публикации: 12.08.2025

Контактная информация:

СВЯТОГОРОВА Анастасия Владимировна — аспирант; svyatogorova@pgups.ru

КОЛОС Ирина Владимировна — канд. техн. наук, доц.; irina_kolos70@bk.ru

КУЗНЕЦОВА Дарина Романовна — магистр; dkuznetsova@pgups.ru

ВАЛЬЦЕВА Татьяна Юрьевна — канд. техн. наук; vtu25@mail.ru

Calculation of Permafrost Soil Thaw Settlement under Dynamic Load

A. V. Svyatogorova¹, I. V. Kolos¹, D. R. Kuznetsova¹, T. Yu. Valtseva²

¹Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²Far Eastern State Transport University, 47 Serysheva str., Khabarovsk, 680021, Russian Federation

For citation: Svyatogorova A. V., Kolos I. V., Kuznetsova D. R., Valtseva T. Yu. Calculation of Permafrost Soil Thaw Settlement under Dynamic Load. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 3, pp. 124–134. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-124-134

Summary

Purpose: To develop a methodology for calculating the thaw settlement of permafrost soils of the railway subgrade under dynamic loads. To conduct a comparative analysis of the calculation results of soil settlement under dynamic loads and traditional calculations based on a static approach. **Method:** The initial parameters for performing settlement calculations were determined through experimental means, by conducting laboratory soil studies in a three-axis compression unit. The numerical finite element method (FEM), implemented in the specialized COMSOL Multiphysics software package, was utilized to simulate the settlement process. This complex enabled consideration of the particularities of the interaction between complex geological conditions and dynamic loads induced by railway transport movement. **Results:** The calculation demonstrated that the degree of railway subgrade settlement under dynamic load significantly exceeds that obtained using the traditional static calculation method. This finding emphasizes the necessity of incorporating dynamic parameters into the assessment of railway embankment stability on permafrost soils. **Practical significance:** It is imperative to consider dynamic loads when assessing the reliability and durability of structures in permafrost regions, as this can significantly affect the overall integrity and longevity of such structures. The implementation of the proposed technique will facilitate the accurate prediction of potential deformation and settlement of the soil foundations, thereby contributing to the prevention of premature degradation and emergency situations. Consequently, the findings of this research will be of significant practical value in enhancing the safety and efficiency of railway construction and operation in permafrost zones.

Keywords: Settlement, railway transport, thawing soils, railway subgrade, dynamic loads, permafrost soils.

References

1. Yurchenko V. A. *Vechnaya merzlota: geokriologicheskie opasnosti i regional'naya degradatsiya merzlykh gruntov* [Perennial permafrost: geocryological hazards and regional degradation of frozen soils]. IVD, 2023, Iss. 8(104). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vechnaya-merzlota-geokriologicheskie-opasnosti-i-regionalnaya-degradatsiya-merzlyh-gruntov>. (In Russian)
2. Zaytsev A. A. *Kompleksnaya metodika avtomatizirovannoy otsenki dinamicheskoy ustoychivosti zheleznodorozhnykh nasypey: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.22.06* [Complex methodology for automated assessment of dynamic stability of railway embankments: dis. ... Cand. of Engineering Sciences: 05.22.06]. Moscow, 2000, 255 p. (In Russian)
3. Bushuev N. S., Shkurnikov S. V., Gerasimov V. A. et al. Osobennosti proektirovaniya trassy zheleznoy dorogi v usloviyakh vечноy merzloty [Features of railway route design under permafrost conditions]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling]. 2019, Iss. 3(63), pp. 135–142. (In Russian)

4. GOST 12248—2010. *Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya kharakteristik prochnosti i deformiruemosti* [GOST 12248—2010. Soils. Methods for laboratory determination of strength and deformability characteristics]. (In Russian)
5. ASTM D1196—93. Standard Test Method for Nonrepetitive Static Plate Load Tests of Soils and Flexible Pavement Components, for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements. 2004.
6. *Metodicheskie rekomendatsii po provedeniyu ispytaniy v pribore trekhosnogo szhatiya avtomatizirovannom GT 1.3.5* [Methodical recommendations for testing in automated triaxial compression device GT 1.3.5]. OOO NPP GEOTEK. (In Russian)
7. GOST R 56353—2015. *Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya dinamicheskikh svoystv dispersnykh gruntov* [GOST R 56353—2015. Soils. Methods for laboratory determination of dynamic properties of dispersed soils]. (In Russian)
8. Sal'nikov V. B., Belyakov V. A. *Teplotekhnicheskie raschety stroitel'nykh konstruktsiy s primeneniem programmnogo kompleksa COMSOL Multiphysics: ucheb.-metod. posobie; pod red. V. N. Alekhina* [Thermal engineering calculations of building structures using COMSOL Multiphysics software package; ed. by V. N. Alekhina]. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta Publ., 2016, 48 p. (In Russian)
9. Prokudin I. V. *Prochnost' i deformativnost' zheleznodorozhnogo zemlyanogo polotna iz glinistyykh gruntov, vosprinimayushchikh vibrodinamicheskuyu nagruzku: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.22.06* [Strength and deformability of railway earthwork made of clay soils under vibrodynamic load: dis. ... Doctor of Engineering Sciences: 05.22.06]. Leningrad, 1982, 458 p. (In Russian)
10. SP 50-101—2004. *Proektirovanie i ustroystvo osnovaniy i fundamentov zdaniy i sooruzheniy* [SP 50-101—2004. Design and construction of foundations and bases of buildings and structures]. (In Russian)

Received: June 15, 2025

Accepted: August 12, 2025

Author's information:

Anastasia V. SVYATOGOROVA — Postgraduate Student; svyatogorova@pgups.ru

Irina V. KOLOS — PhD in Engineering, Associate Professor; irina_kolos70@bk.ru

Darina R. KUZNETSOVA — Master's Degree Student; dkuznetsova@pgups.ru

Tatiana Yu. VALTSEVA — PhD in Engineering; vtu25@mail.ru

УДК 625.141

Влияние технологий стабилизации на деформационные характеристики балластной призмы железнодорожного пути

Д. Н. Сомов¹, А. В. Петряев¹, И. Л. Парахненко², Н. И. Тенирядко³

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

²Уральский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

³Российский университет транспорта, Российская Федерация, 127994, Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9

Для цитирования: Сомов Д. Н., Петряев А. В., Парахненко И. Л., Тенирядко Н. И. Влияние технологий стабилизации на деформационные характеристики балластной призмы железнодорожного пути // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 3. — С. 135–148. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-135-148

Аннотация

Цель: Целью работы являлась оценка эффективности двух методов стабилизации балластной призмы железнодорожного пути: технологии послойного уплотнения балласта и армирования балластного слоя георешеткой. **Методы:** Для проведения исследований была создана модель балластной призмы, на которой проводились динамические испытания, имитирующие воздействие проходящего поезда. В ходе экспериментов измерялись осадки балластной призмы при использовании каждой из рассматриваемых технологий, а также в контрольном варианте без применения каких-либо дополнительных мер. **Результаты:** Результаты демонстрируют влияние каждой технологии на деформационные характеристики балластной призмы и позволяют оценить их эффективность в снижении осадок и повышении общей стабильности железнодорожного пути. В частности, показано, что применение георешетки и послойного уплотнения приводит к значительному уменьшению вертикальных деформаций по сравнению с неармированным балластом. **Практическая значимость:** Полученные выводы имеют важное значение для оптимизации конструктивных решений при строительстве и реконструкции железнодорожных путей и могут способствовать повышению их надежности и долговечности.

Ключевые слова: Балластная призма, динамическая нагрузка, стабилизация балласта, послойное уплотнение, осадка, георешетка.

Введение

Железнодорожный балласт, состоящий из щебня, является важным элементом железнодорожного пути. Он обеспечивает устойчивость, вертикальную и боковую поддержку, распределяет нагрузку на основание и обеспечивает дренаж. Повышение нагрузки на железнодорожные пути из-за увеличения грузоперевозок и пассажиропотока приводит к износу и уплотнению балласта, требуя частого обслуживания и увеличивая потребность в новых материалах. Развитие высокоскоростного транспорта также предъявляет повышенные требования к балласту, поскольку он должен обеспечивать стабильность и равномерное распределение нагрузки для обеспечения безопасного и эффективного движения. Согласно [1]

динамика процессов в балластном слое до сих пор изучена недостаточно. Это приводит к значительным и постоянно увеличивающимся расходам на техническое обслуживание железнодорожных путей.

Лобо-Герреро и Вальехо [2] установили, что деформация балластного слоя происходит из-за сложного взаимодействия нескольких процессов, включая осадку, перераспределение частиц, разрушение и износ щебня. Эти процессы, действуя совместно, приводят к общей деформации. Тхакур [3] представил описание аналогичной деградации балластного слоя на участке в Новом Южном Уэльсе, предшествующей техническому обслуживанию.

Механизмы деградации балласта в зависимости от частоты нагрузки изучены недостаточно, равно как и отсутствует модель, учитывающая скорость поезда и разрушение частиц щебня. Это ограничивает возможность проектирования систем пути, которые могли бы безопасно и экономично поддерживать высокоскоростное движение. Для решения этой проблемы требуется изучение поведения балласта при различных частотах и разработка более точной модели циклического уплотнения, которая позволит инженерам более точно прогнозировать затраты на жизненный цикл балласта [3].

Реймонд [4] исследовал влияние армирования балласта на его поведение при многократных нагрузках, изучая армированные и неармированные слои зернистого материала на различных основаниях. Было установлено, что армирование георешеткой уменьшает пластическую деформацию на 13–30 %, особенно на слабых основаниях. Реймонд также предположил, что использование георешетки на железнодорожном пути может увеличить цикл обслуживания с 3 месяцев до 3 лет. Однако следует учитывать, что эксперимент проводился в уменьшенном масштабе с использованием мелкого щебня и относительно крупной георешетки, что могло повлиять на результаты, хотя общие выводы согласуются с другими исследованиями.

Исследования, проводимые в Университете Иллинойса [5], показали, что георешетки могут быть эффективны для армирования балластного слоя, однако их эффективность зависит от состояния балласта. Трехосные испытания с использованием разных типов георешеток показали, что сцепление между георешеткой и балластом снижается при деградации щебня.

Изнашивание железнодорожного балласта под воздействием циклических нагрузок приводит к необходимости его периодической замены. Переработанный балласт — более экономичная альтернатива, однако его значительная осадка ограничивает его применение. В данной работе [6] предлагается решение этой проблемы путем стабилизации переработанного балласта с помощью георешетки. Лабораторные испытания с циклической нагрузкой показали, что армирование улучшает характеристики переработанного балласта, делая его пригодным для использования в железнодорожном строительстве.

В данном исследовании [7] была построена полномасштабная секция железнодорожного пути для сравнения армированного и неармированного балласта. Георешетка, размещенная на глубине 7 дюймов под шпалами, продемонстрировала существенные улучшения: осадка уменьшилась до 1 дюйма в некоторых местах под шпалами, а загрязнение балласта снизилось на 30 % под шпалами и на 20 % на уровне подстилающего грунта. Это свидетельствует о высокой эффективности применения георешетки для усиления балластного слоя. Однако для оптимального использования георешетки необходимо определить ее параметры: размер ячеек, геометрию и количество слоев. В работе [8] представлены результаты исследования влияния количества слоев и размера ячеек георешетки на осадку балласта. Исследование проводилось с помощью лабораторных динамических испытаний, что дает возможность определить оптимальные характеристики для практического применения.

Точность лабораторных испытаний балласта зависит от адекватного моделирования нагрузок и бокового ограничения. Данное исследование [9] разработало и проверило методику, обеспечивающую соответствие лабораторных и полевых условий. Было показано, что уменьшение бокового ограничения увеличивает постоянные деформации и разрушение балласта. Полученные результаты позволяют более точно прогнозировать долговременное поведение балласта и планировать мероприятия по его техническому обслуживанию.

В исследовании [10] была разработана программа штамповых испытаний армированного геоматериалами балласта. Проведение этих испытаний необходимо из-за недостатка надежных данных для оценки влияния геоматериалов на деформации стабилизированного железнодорожного балласта. Основная цель этих испытаний состояла в изучении и оценке влияния различных типов геоматериалов на деформируемость щебня в зависимости от способа армирования и величины эксплуатационных нагрузок.

В работе [11] показано, что георешетка является эффективным решением для уменьшения бокового смещения балласта, подверженного циклическим нагрузкам. Испытания доказали, что георешетка способна эффективно уменьшать боковое смещение, снижать осадку и минимизировать разрушение частиц балласта.

Армирование подбалластного слоя георешеткой обеспечивает более высокую прочность сдвига по сравнению с использованием геомембраны. Более плотный армированный георешеткой подбалластный слой демонстрирует лучшие характеристики в широком диапазоне плотностей, что говорит о большей эффективности использования георешетки [12].

Фишер [13] провел долгосрочное полевое исследование, в котором изучалось влияние различных типов геосинтетического армирования на поведение железнодорожного балласта. В течение более одиннадцати лет на загруженной магистральной линии в Венгрии наблюдалось пять различных видов георешетки. Результаты

испытаний, представленные в статье, включали математико-статистический анализ для сравнения армированных и неармированных участков. На основе анализа были выявлены различия в поведении и износе железнодорожного пути при использовании различных типов геосинтетики. Работа [14] подчеркивает результаты полевых исследований, которые помогли установить количественные показатели эффективности геосинтетического армирования железнодорожного балласта. Эксперименты, проведенные с использованием калиброванной нагрузки, показали, что геосинтетики улучшают стабильность пути сразу после ремонта, и эта стабильность сохраняется с течением времени.

Экспериментальная часть

Материалы

Состав модели для проведения полномасштабных испытаний щебеночного балласта для железной дороги I категории под циклической нагрузкой представлен в табл. 1. В качестве балластного материала был использован базальт с номинальным размером зерен от 22,4 до 63 мм со средней плотностью зерен не менее $2,4 \text{ г/см}^3$, получаемый дроблением плотных горных пород с последующим рассевом продуктов дробления.

ТАБЛИЦА 1. Состав модели для испытаний

Размер ячейки квадратного сита, мм	Частный остаток, % по массе
63	—
50	30
45	25
40	20
30	13
25	7
20	3
10	2
5	—

Геосинтетический материал представлен георешеткой (рис. 1), состоящей из соединенных между собой элементов, образующих ячейки в форме треугольников и шестиугольников.



Рис. 1. Георешетка. Автор: Д. Н. Сомов

Лабораторное оборудование

Лабораторные испытания по оптимизации параметров балластной призмы проводятся на испытательной машине (пульсаторе) Amsler HB 250 (рис. 2). Нагрузка на половину балластной призмы прикладывается через железобетонный штамп, представляющий собой полушпалу. Размеры металлического ящика составляют $2700 \times 1000 \times 500$ мм.



Рис. 2. Общий вид модели на испытательной установке. Автор: Д. Н. Сомов

Методика испытаний

Схема лабораторной модели для проведения испытаний приведена на рис. 3.

Перед засыпкой щебня в металлический ящик необходимо было уложить упругое основание толщиной 10 мм с модулем деформации 80 МПа. Для исключения локальных деформаций на упругий слой укладывался лист фанеры толщиной 10 мм.

Щебень из подготовленного зернового состава необходимо промыть для удаления пылеватых частиц с поверхности.

Далее производилась укладка щебня подготовленного зернового состава.

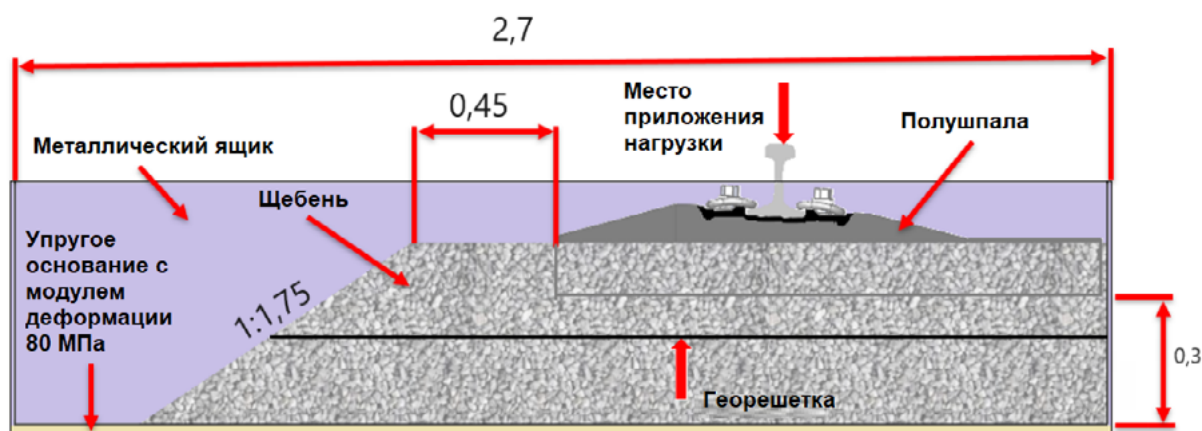


Рис. 3. Схема стендовых испытаний. Автор: Д. Н. Сомов

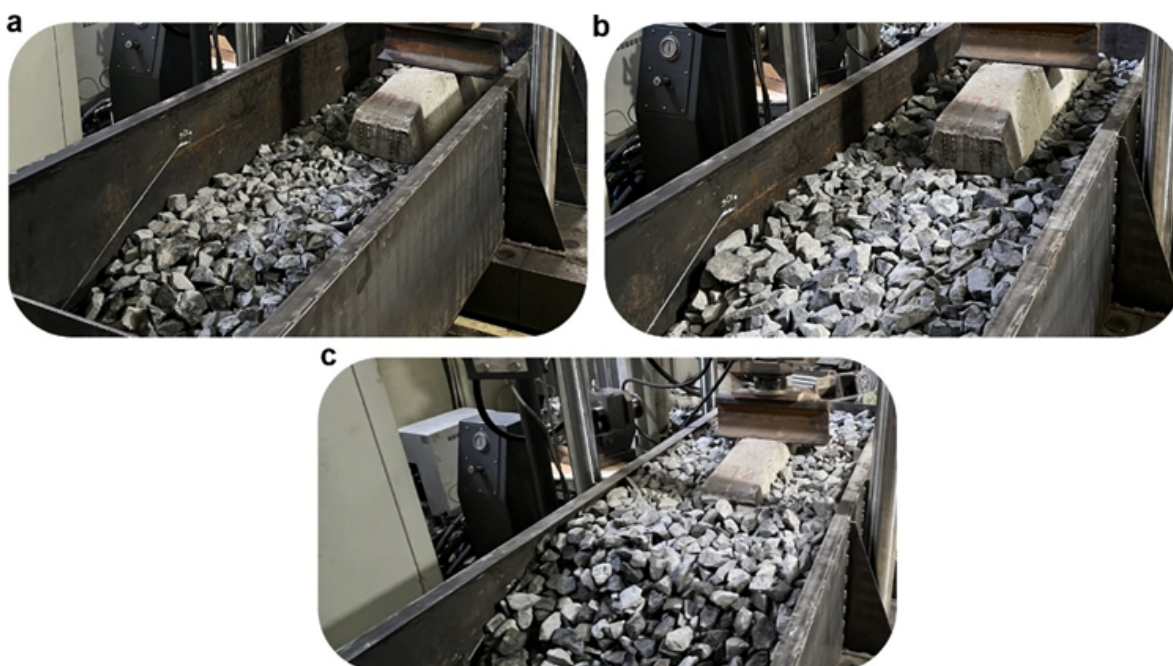


Рис. 4. *a* — уплотнение первого слоя; *b* — уплотнение второго слоя; *c* — итоговая модель. Автор: Д. Н. Сомов

К модели необходимо прикладывать циклическую нагрузку, которая даст напряжения под штампом, равные напряжениям под шпалой от поездной нагрузки. Площадь штампа равняется $0,405 \text{ м}^2$, следовательно, сосредоточенная сила должна составлять 50 кН.

Технология послойного уплотнения заключается в том, что щебень послойно уплотняется каждые 10 см (рис. 4). Каждый слой уплотняется путем приложения динамической нагрузки 50 кН с частотой 8 Гц в течение 100 000 циклов. В случае если толщина оказывалась меньше 10 см, на уплотненный слой необходимо досыпать дополнительный материал и повторно уплотнить его в течение 100 000 циклов с ранее указанными нагрузкой и частотой. Отсыпка происходит ступенчато, что необходимо для дальнейшего формирования требуемого уклона откоса балластной призмы. На уплотненный щебень укладывается железобетонный штамп на расстоянии 300 мм от стенок ящика и 30 мм в соответствии со схемой, представленной на рис. 3. Нагрузка прикладывается равномерно распределенной по поверхности штампа. Количество циклов нагружения составляет 2 000 000. В ходе испытаний фиксируется значение вертикальной осадки.

Технология послойного уплотнения с усилением георешеткой балластной призмы схожа с предыдущей технологией. Производится уплотнение двух слоев щебня, каждый из которых равен 10 см, с последующей укладкой георешетки (рис. 5). Значения динамической нагрузки, частоты и количества циклов остаются неизменными.

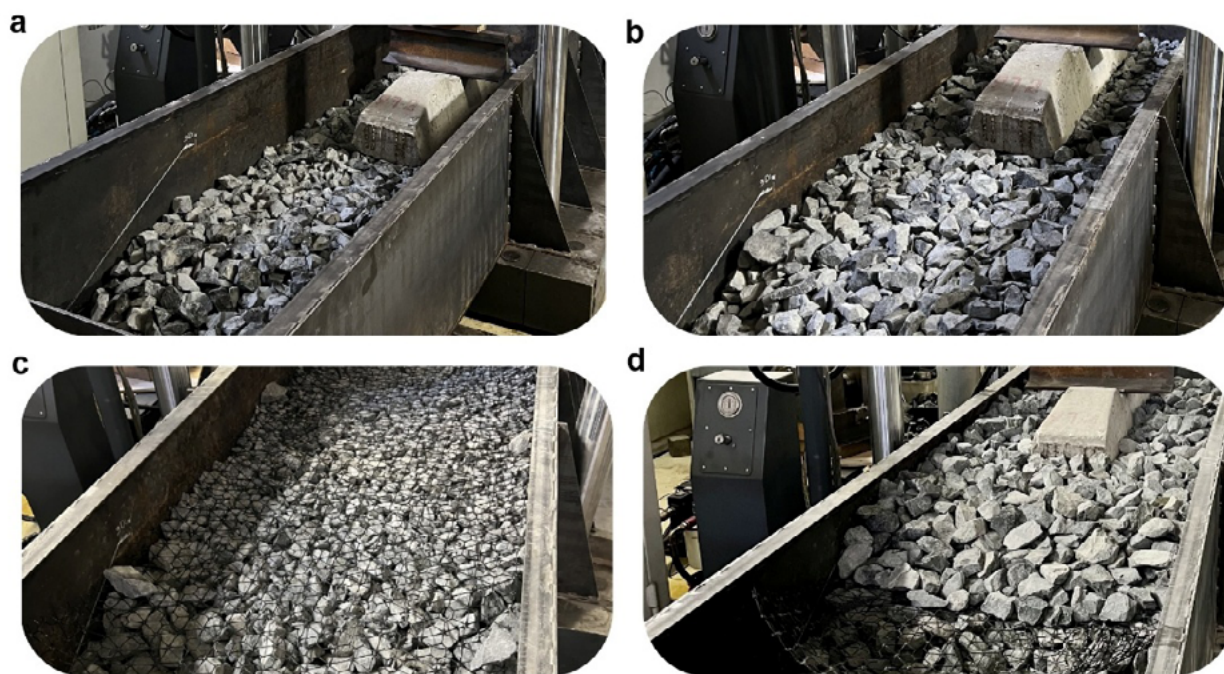


Рис. 5. *a* — уплотнение первого слоя; *b* — уплотнение второго слоя; *c* — укладка георешетки; *d* — итоговая модель. Автор: Д. Н. Сомов

Для сопоставления с технологиями послойного уплотнения было также проведено испытание с равномерно уложенным слоем балласта величиной 30 см под шпалой без предварительного послойного уплотнения.

Результаты испытаний

Результаты накопления остаточных деформаций штампа в ходе циклического нагружения при испытаниях модели приведены на рис. 6.

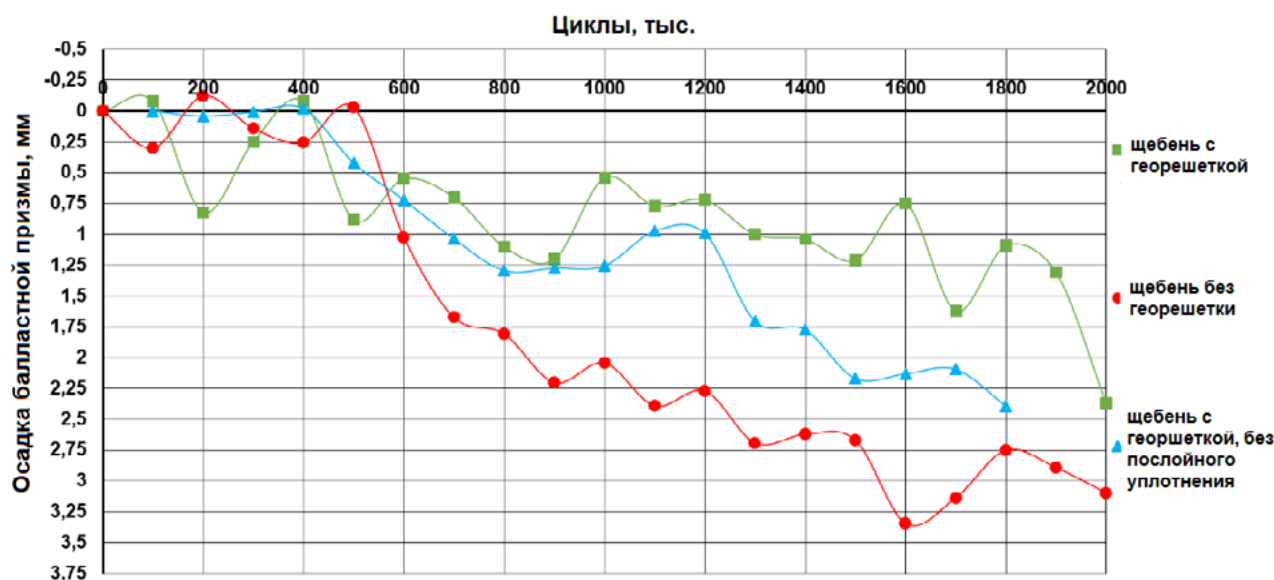


Рис. 6. График интенсивности осадки балластной призмы от количества циклов нагрузки. Автор: Д. Н. Сомов

График иллюстрирует интенсивность осадки балластной призмы железнодорожного пути в зависимости от количества циклов нагрузки для нескольких технологий.

Метод стабилизации балласта без послойного уплотнения показал наибольшую осадку с течением времени. Наблюдается повышенная амплитудность, указывающая на неравномерную осадку под воздействием циклической нагрузки. Значения осадки аппроксимируются прямой линией, демонстрирующей приблизительно линейное нарастание осадки.

Технология возведения балластной призмы с георешеткой без послойного уплотнения показала осадки существенно ниже, чем у варианта без георешетки. При этом амплитудность менее выражена, чем у балласта без георешетки, что позволяет снизить интенсивность роста осадок.

Наилучшим образом показала себя технология послойного уплотнения с введением в балластную призму георешетки. Интенсивность осадки значительно меньше, чем в случае без георешетки, так же как и амплитуда колебаний, которая

существенно меньше. Линейная аппроксимация показывает меньший наклон, что говорит о меньшей интенсивности осадки.

Для всех трех технологий на рис. 7 представлены линейные аппроксимации, которые упрощают визуальное восприятие интенсивности осадки, а также позволяют вычислить коэффициент снижения интенсивности осадки (1).

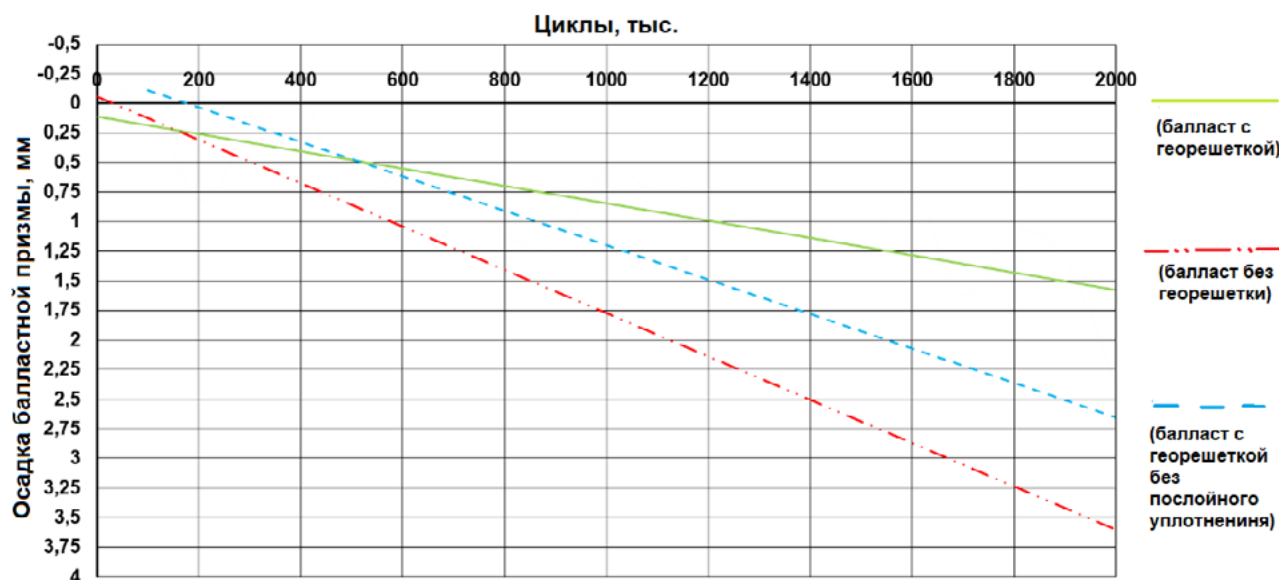


Рис. 7. Линейная аппроксимация данных испытания. Автор: Д. Н. Сомов

Коэффициент снижения интенсивности осадки:

$$K_g(s) = \frac{V(s)}{V_g(s)}, \quad (1)$$

где $V(s)$ — интенсивность осадки без геосинтетического материала, мм/тыс. циклов;

$V_g(s)$ — интенсивность осадки с геосинтетическим материалом, мм/тыс. циклов.

Вычисленный коэффициент для каждого метода стабилизации приведен на рис. 8.

Полученные результаты доказывают эффективность использования георешетки для уменьшения осадки балластной призмы. Применение георешетки существенно снижает как общую осадку, так и ее интенсивность. Предварительное уплотнение балласта с георешеткой дополнительно повышает эффективность армирования. Вариант без георешетки и без уплотнения показывает наихудшие результаты. Линейные аппроксимации позволяют оценить интенсивность осадки для каждого метода, подтверждая преимущество использования георешетки и предварительного уплотнения — коэффициент снижения интенсивности растет

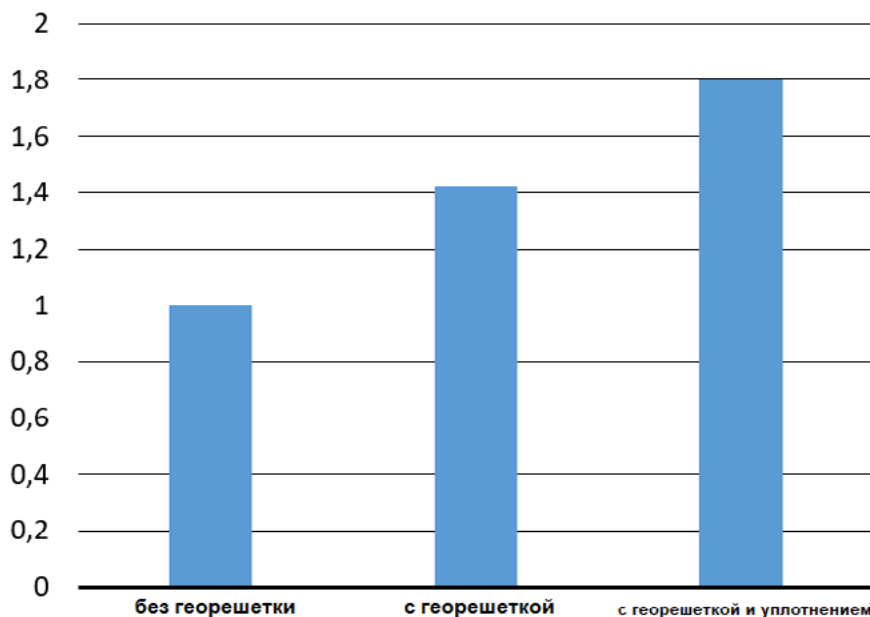


Рис. 8. Коэффициент снижения интенсивности осадки. Автор: Д. Н. Сомов

с использованием методов стабилизации балластной призмы. Амплитуда кривых указывает на неравномерность распределения напряжений в балласте, которая сильнее выражена в случае отсутствия георешетки.

Выводы

На основе представленного текста можно сформулировать следующие выводы:

1. Экспериментальное исследование подтвердило эффективность как послойного уплотнения балласта, так и армирования его георешеткой для повышения стабильности железнодорожного пути под динамическими нагрузками.
2. Совместное применение этих двух методов обеспечивает наилучшие результаты по снижению осадки балластной призмы.
3. Георешетка значительно снижает как общую осадку, так и ее неравномерность (амплитуду колебаний осадки во времени).
4. Предварительное уплотнение балласта дополнительно повышает эффективность применения георешетки.
5. Метод без применения каких-либо методов стабилизации продемонстрировал наихудшие результаты, характеризующиеся наибольшей осадкой и ее неравномерностью.
6. Анализ интенсивности осадки (коэффициент снижения интенсивности) подтверждает преимущества использования георешетки и предварительного уплотнения. С введением георешетки в конструкцию балластной призмы значение коэффициента — 1,4, с применением послойного уплотнения и георешетки — 1,8.

7. Полученные результаты позволяют оптимизировать конструктивные решения при строительстве и реконструкции железнодорожных путей.

8. Применение георешетки и послойного уплотнения рекомендуется для повышения надежности и долговечности верхнего строения пути.

Будущие исследования

Дальнейшие исследования будут направлены на уточнение оптимальных параметров послойного уплотнения и выбора типа георешетки в зависимости от конкретных условий эксплуатации железнодорожного пути.

Список источников

1. Popp K. System dynamics and long-term behavior of railway vehicles, track and subgrade / K. Popp, K. Knothe, C. Popper // *Vehicle System Dynamics*. — 2005. — Vol. 43. — Iss. 6–7. — Pp. 485–538.
2. Lobo-Guerrero S. Discrete Element Method Analysis of Railtrack Ballast Degradation during Cyclic Loading / S. Lobo-Guerrero, L.E. Vallejo // *Granular Matter*. — 2006. — Vol. 8. — Pp. 195–204. — URL: <https://doi.org/10.1007/s10035-006-0006-2>.
3. Thakur P. K. Cyclic densification of ballast and associated deformation and degradation: Ph. D. Thesis / P. K. Thakur. — University of Wollongong, 2011.
4. Raymond G. P. Reinforced ballast behavior subjected to repeated loading / G. P. Raymond // *Geotextiles and Geomembranes*. — 2001. — Vol. 20. — Iss. 1. — Pp. 39–61. — DOI: 10.1016/s0266-1144(01)00024-3.
5. Qian Yu. Characterize Behavior of Geogrid Reinforced Ballast at Different Levels of Degradation Through Triaxial Shear Strength Test and Discrete Element Modeling / Yu Qian, D. Mishra, E. Tutumluer, H.A. Kazmee // *Geotextiles and Geomembranes*. — 2015. — Vol. 43. — Iss. 5. — Pp. 393–402. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.04.012>.
6. Indraratna B. Improvement of recycled ballast using geosynthetics / B. Indraratna, W. Salim, D. Christie // *Rail international*. — 2002. — Pp. 1177–1182.
7. Jowkar M. Performance of geogrid reinforced ballast under dynamic loading / M. Jowkar. — Published Online First: 31 December 2011.
8. Abrashitov A. Laboratory study of ballast material reinforced by flat geogrid under the dynamic load / A. Abrashitov, A. Sidrakov // *MATEC Web Conf.* — 2019. — Vol. 265. — P. 01006. — URL: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201926501006>.
9. Jideani T. C. U., Grabe P. J. The development of suitable cyclic loading and boundary conditions for ballast box tests / T. C. U. Jideani, P. J. Grabe // *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*. — 2019. — Vol. 61. — Iss. 4. — Pp. 59–72. — URL: <https://doi.org/10.17159/2309-8775/2019/v61n4a6>.

10. Petriaev A. Stamp Test of Railway Ballast, Stabilized by Geogrids / A. Petriaev, V. Ganchits, M. Chetina, I. Kozlov et al. // *Transportation Soil Engineering in Cold Regions*, vol. 2 / A. Petriaev, A. Konon (eds). — Lecture Notes in Civil Engineering, vol. 50. — Springer, Singapore, 2020. — URL: https://doi.org/10.1007/978-981-15-0454-9_6.
11. Indraratna B. The lateral displacement response of geogrid-reinforced ballast under cyclic loading / B. Indraratna, Syed Hussaini, J. S. Vinod // *Geotextiles and Geomembranes*. — 2013. — Vol. 39. — Pp. 20–29. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2013.07.007>.
12. Biabani M. An evaluation of the interface behaviour of rail subballast stabilised with geogrids and geomembranes / M. Biabani, B. Indraratna // *Geotextiles and Geomembranes*. — 2015. — Vol. 43. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.04.002>.
13. Fischer S. Geogrid reinforcement of ballasted railway superstructure for stabilization of the railway track geometry — A case study / S. Fischer // *Geotextiles and Geomembranes*. — 2022. — Vol. 50. — Iss. 5. — Pp. 1036–1051. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2022.05.005>.
14. Petriaev A. Stress Response Analyses of Ballasted Rail Tracks, Reinforced by Geosynthetics / A. Petriaev // *Procedia Engineering*. — 2017. — Vol. 189. — Pp. 660–665. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.105>.

Дата поступления: 14.07.2025

Решение о публикации: 04.08.2025

Контактная информация:

СОМОВ Даниил Николаевич — аспирант, инженер кафедры «Строительство дорог транспортного комплекса»; somovdaniil2000@gmail.com

ПЕТРЯЕВ Андрей Владимирович — д-р техн. наук, ст. науч. сотр. кафедры «Строительство дорог транспортного комплекса»; pgups60@mail.ru

ПАРАХНЕНКО Инна Леонидовна — канд. техн. наук, доц. кафедры «Путь и железнодорожное строительство»; iparahnenko@usurt.ru

ТЕНИРЯДКО Надежда Ивановна — канд. техн. наук, доц. кафедры «Автомобильные дороги, аэродромы, основания и фундаменты»; nad1010@inbox.ru

Influence of Stabilization Technologies on Deformation Parameters of a Railway Track Ballast Prism

D. N. Somov¹, A. V. Petriaev¹, I. L. Parakhnenko², N. I. Teniryadko³

¹Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²Ural State University of Railway Transport, 66, Kolmogorova str., Ekaterinburg, 620034, Russian Federation,

³Russian University of Transport, 9, bld. 9, Obraztsova str., Moscow, 127994, Russian Federation

For citation: Somov D. N., Petriaev A. V., Parakhnenko I. L., Teniryadko N. I. Influence of Stabilization Technologies on Deformation Parameters of a Railway Track Ballast Prism. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 3, pp. 135–148. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-135-148

Summary

Purpose: To evaluate the effectiveness of two methods for stabilizing railway ballast: layer-by-layer ballast compaction technology and geogrid reinforcement of the ballast layer. **Methods:** The research was conducted using a ballast prism model, on which dynamic tests were performed in order to simulate the impact of a passing train. During the course of the experiments, the settlement of the ballast prism was measured applying each of the technologies under study. The control measurements without any reinforcement were performed as well. **Results:** The experiment results demonstrate the positive influence of the technologies under study on the deformation parameters of the ballast prism and allow for evaluating their effectiveness in reducing settlement and improving the overall stability of the railway track. The application of geogrids and layer-by-layer compaction has been shown to result in a significant reduction in vertical deformations compared to the ballast without reinforcement. **Practical significance:** The conclusions that are derived from this study will be of great importance when it comes to the optimization of design solutions in the construction and reconstruction of railway tracks. Furthermore, they can contribute to the improvement of their reliability and durability.

Keywords: Ballast prism, dynamic loading, ballast stabilization, layer-by-layer compaction, settlement, geogrid.

References

1. Popp K., Knothe K., Popper C. System dynamics and long-term behavior of railway vehicles, track and subgrade. *Vehicle System Dynamics*. 2005, vol. 43, Iss. 6–7, pp. 485–538.
2. Lobo-Guerrero S., Vallejo L. E. Discrete Element Method Analysis of Railtrack Ballast Degradation during Cyclic Loading. *Granular Matter*. 2006, vol. 8, pp. 195–204. DOI: 10.1007/s10035-006-0006-2.
3. Thakur P. K. Cyclic densification of ballast and associated deformation and degradation: Ph. D. Thesis. University of Wollongong, 2011.
4. Raymond G. P. Reinforced ballast behavior subjected to repeated loading. *Geotextiles and Geomembranes*. 2001, vol. 20, Iss. 1, pp. 39–61. DOI: 10.1016/s0266-1144(01)00024-3.
5. Qian Yu, Mishra D., Tutumluer E., Kazmee H. A. Characterize Behavior of Geogrid Reinforced Ballast at Different Levels of Degradation Through Triaxial Shear Strength Test and Discrete Element Modeling. *Geotextiles and Geomembranes*. 2015, vol. 43, Iss. 5, pp. 393–402. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2015.04.012.
6. Indraratna B., Salim W., Christie D. Improvement of recycled ballast using geosynthetics. *Rail international*, 2002, pp. 1177–1182.
7. Jowkar M. Performance of geogrid reinforced ballast under dynamic loading. Published Online First: 31 December 2011.
8. Abrashitov A., Sidrakov A. Laboratory study of ballast material reinforced by flat geogrid under the dynamic load. *MATEC Web Conf.* 2019, vol. 265, p. 01006. DOI: 10.1051/mateconf/201926501006.
9. Jideani T. C. U., Grabe P. J. The development of suitable cyclic loading and boundary conditions for ballast box tests. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*. 2019, vol. 61, Iss. 4, pp. 59–72. DOI: 10.17159/2309-8775/2019/v61n4a6.

10. Petriaev A., Ganchits V., Chetina M., Kozlov I. et al. Stamp Test of Railway Ballast, Stabilized by Geogrids. *Transportation Soil Engineering in Cold Regions*, vol. 2. *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 50. Springer, Singapore, 2020. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_6.
11. Indraratna B., Hussaini Syed, Vinod J. S. The lateral displacement response of geogrid-reinforced ballast under cyclic loading. *Geotextiles and Geomembranes*. 2013, vol. 39, pp. 20–29. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2013.07.007.
12. Biabani M., Indraratna B. An evaluation of the interface behaviour of rail subballast stabilised with geogrids and geomembranes. *Geotextiles and Geomembranes*. 2015, vol. 43. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2015.04.002.
13. Fischer S. Geogrid reinforcement of ballasted railway superstructure for stabilization of the railway track geometry — A case study. *Geotextiles and Geomembranes*. 2022, vol. 50, Iss. 5, pp. 1036–1051. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2022.05.005.
14. Petriaev A. Stress Response Analyses of Ballasted Rail Tracks, Reinforced by Geosynthetics. *Procedia Engineering*. 2017, vol. 189, pp. 660–665. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.105.

Received: July 14, 2025

Accepted: August 04, 2025

Author's information:

Daniil N. SOMOV — Postgraduate Student, Engineer, Department “Road Construction of Transport Systems”; somovdaniil2000@gmail.com

Andrey V. PETRYAEV — Dr. Sci. in Engineering, Senior Research Fellow, Department “Road Construction of Transport Systems”; pgups60@mail.ru

Inna L. PARAKHNENKO — PhD in Engineering, Associate Professor, Department “Track and Railway Construction”; Iparahnenko@usurt.ru

Nadezhda I. TENIRYADKO — PhD in Engineering, Associate Professor, Department “Highways, airfields, bases and foundations”; nad1010@inbox.ru

УДК 625.111; 519.876.5

Формирование множества вариантов допустимых проектных решений при трассировании железной дороги в условиях пересеченного рельефа местности

В. А. Анисимов, Р. Д. Пренинг, Н. Ю. Ильин, Г. А. Стрехнин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Анисимов В. А., Пренинг Р. Д., Ильин Н. Ю., Стрехнин Г. А. Формирование множества вариантов допустимых проектных решений при трассировании железной дороги в условиях пересеченного рельефа местности // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 3. — С. 149–158. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-149-158

Аннотация

Цель: Создание информационной основы для модернизации существующих и разработки новых методов оптимального трассирования железной дороги на участках со сложным пересеченным рельефом местности. **Методы:** Применены математическое моделирование, методы оптимизации и теории принятия решений. **Результаты:** Поставлен вычислительный эксперимент, определены этапы его проведения, и разработан алгоритм формирования множества допустимых вариантов трассы на участке местности с продольным водоразделом, двумя поперечными водоразделами и логом. **Практическая значимость:** Сформированные по результатам проведения эксперимента множества допустимых вариантов трассы на участках со сложным пересеченным рельефом местности послужат информационной основой совершенствования математического обеспечения реализации новой технологии автоматизированного проектирования железных дорог, которая должна кардинально снизить затраты времени на принятие эффективных проектных решений.

Ключевые слова: Трасса железной дороги, план трассы, проектная линия, пересеченный рельеф местности, математическая модель, методы оптимизации.

В процессе проектирования железных дорог основополагающим является этап трассирования. Найденное пространственное положение трассы определяет технические и экономические показатели железной дороги, степень ее влияния на окружающую среду, а также объем капиталоемких вложений и эксплуатационных расходов. Нередко на пути трассы встречаются сложные участки пересеченной местности с выраженным неровным рельефом и большими перепадами высот. В таких условиях малейшие сдвиги трассы могут в значительной степени повлиять на изменение объема строительно-монтажных работ. В существующих системах автоматизированного проектирования (САПР) корректность принятых решений по плану трассы и проектной линии железной дороги полностью зависит от квалификации и опыта инженера-проектировщика. На участках со сложными условиями пересеченного рельефа местности он может испытывать серьезные затруднения в принятии проектного решения, для разрешения которых требуются значительные затраты времени на расчеты, анализ и сравнение множества возможных вариантов трассы.

Активная исследовательская работа по данной проблеме велась в 60–80-х годах прошлого столетия [1–5], и была создана всесоюзная лаборатория автоматизированного проектирования транспортных систем. С внедрением ЭВМ в проектную деятельность и появлением первых САПР были предложены численные методы оптимального трассирования, которые были разработаны для компьютеров того времени.

В нынешнем веке работы в области оптимального трассирования линейных сооружений были продолжены В. И. Стручковым [6–12]. Им исследовано использование в проектировании трасс методов динамического и нелинейного программирования. Для поиска оптимального положения трассы на основе заданного начального варианта ее плана были применены дискретные математические модели в виде ломанных с заданным числом звеньев. Полученные после оптимизации дискретные модели проектной линии и плана трассы затем аппроксимируют в сплайны с учетом ограничений по условиям обеспечения норм проектирования.

Также активные исследования в области автоматизации проектирования железных дорог ведутся А. И. Богдановым. В своих работах [13–15] он представил математические модели плана и продольного профиля трассы железной дороги в виде кусочно-ломанных линий, которые задаются координатами своих вершин. Трассирование новой железной дороги им рассматривается как задача линейной аппроксимации. В качестве аппроксимируемых линий используются магистральный ход и профиль земли, план и продольный профиль трассы являются аппроксимирующими. Для модели плана эти линии представлены угловыми диаграммами.

В настоящее время математические модели и методы, предложенные в [1–15], не получили широкого применения в современных САПР. По нашему мнению, это связано с трудностями технологической реализации данных методов в системах автоматизированного проектирования железных дорог. Поэтому авторами поставлена задача разработки технологичных методов автоматического поиска оптимального положения трассы в пространстве на основе комплексной математической модели плана и продольного профиля трассы железной дороги.

Для ее решения проводится вычислительный эксперимент [16] с использованием САПР «Топоматик Robur» и компьютерной программы «Формирование множества вариантов трассы железной дороги на участках с пересеченным рельефом местности» [17].

На первом этапе проведения эксперимента используются триангуляционная модель рельефа на участке местности с продольным водоразделом 1, поперечными водоразделами 2 и 3, логом 4 (рис. 1) и алгоритм формирования множества вариантов допустимых вариантов трассы:

1. На пересечениях горизонтальных проекций структурных линий поперечных водоразделов 2 и 3, лога 4 и прямой, соединяющей фиксированные точки трассы, назначаются вершины углов поворота ВУ2, ВУ3 и ВУ4 (рис. 2).

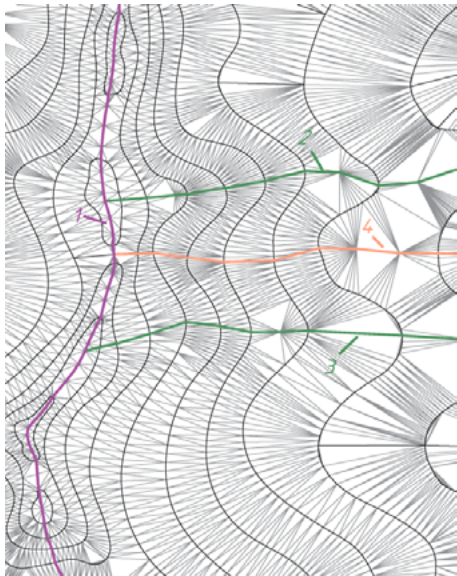


Рис. 1. Цифровая TIN-модель рельефа

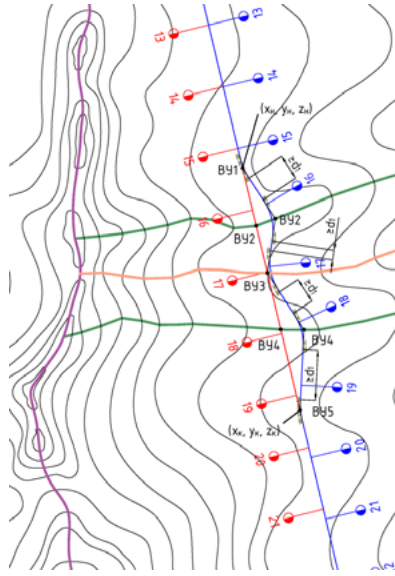
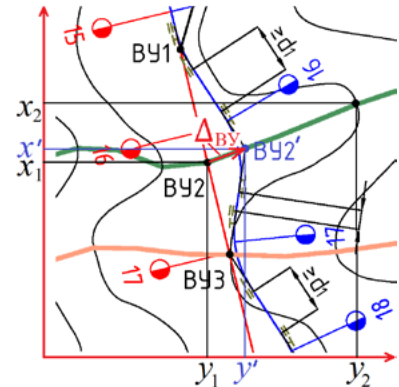


Рис. 2. Формирование допустимых вариантов трассы железной дороги на участке с пересеченным рельефом местности



2. Определяют шаг изменения положения вершин углов поворота $\Delta_{\text{БУ}}$ вдоль структурных линий поперечных водоразделов 2 и 3 в направлении понижения высот (рис. 2).

3. Определяют измененные координаты ВУ2 при ее сдвиге на $\Delta_{\text{БУ}}$ вдоль водораздела 2 (рис. 2):

$$\Delta x = x_2 - x_1,$$

$$\Delta y = y_2 - y_1,$$

$$\alpha_{1-2} = \left\{ \begin{array}{l} \arctg \frac{\Delta y}{\Delta x}, \text{ при } \Delta x > 0, \Delta y > 0 \\ 180^\circ + \arctg \frac{\Delta y}{\Delta x}, \text{ при } \Delta x < 0, \Delta y > 0 \text{ или } \Delta y < 0 \\ 360^\circ + \arctg \frac{\Delta y}{\Delta x}, \text{ при } \Delta x > 0, \Delta y < 0 \end{array} \right\}$$

$$x' = \Delta_{\text{БУ}} \cdot \cos \alpha_{1-2},$$

$$y' = \Delta_{\text{БУ}} \cdot \sin \alpha_{1-2}.$$

4. Для нового положения ВУ2 подбирают значения радиусов круговых кривых и длин переходных кривых, при которых обеспечиваются основные и допускаемые в трудных условиях нормы проектирования плана трассы железной дороги¹.

¹ СП 119.13330.2024. Железные дороги колеи 1520 мм.

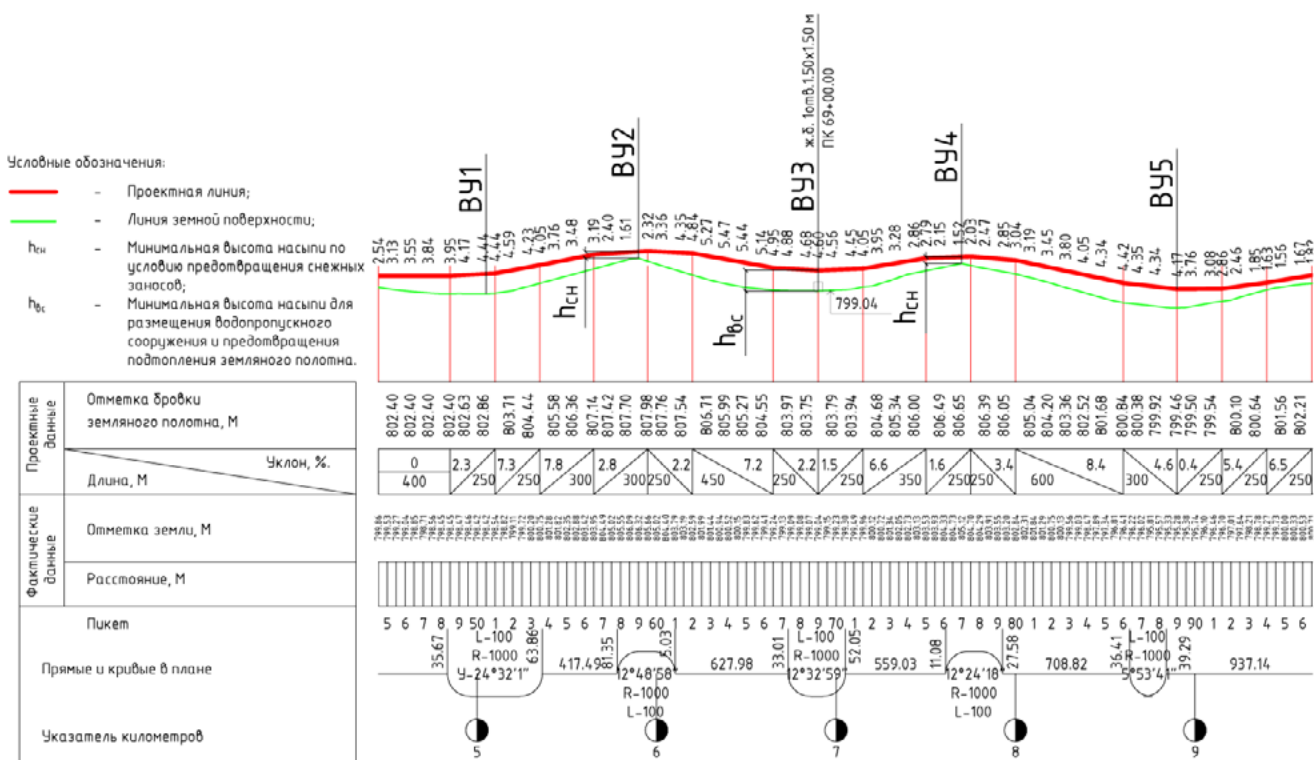


Рис. 3. Проектирование продольного профиля варианта трассы

5. Определяют площадь водосбора, расчетный расход через створ водопропускного сооружения в логе 4, тип и размеры водопропускного сооружения, а также минимальную высоту насыпи в месте его расположения.

6. По новому варианту плана трассы проектируют ее продольный профиль (рис. 3) и вычисляют технико-экономические показатели трассы (таблица).

7. ВУ2 сдвигают на $\Delta_{\text{ВУ}}$ вдоль водораздела 2 до тех пор, пока обеспечиваются нормы проектирования плана трассы, и при каждой сдвижке выполняют действия в пунктах алгоритма 3–6.

8. Действия алгоритма из пп. 3–7 выполняют для вершины угла поворота ВУ4, смещая ее вдоль структурной линии водораздела 3.

9. Среди вариантов, соответствующих нормам проектирования плана трассы железной дороги, отбираются новые комбинации положений ВУ2 и ВУ4 с последующим выполнением этапов алгоритма согласно пунктам 4–6.

10. Во всех сформированных вариантах изменяют положение ВУ3 с шагом $\Delta_{\text{ВУ}}$ по направлению снижения высот вдоль структурной линии лога 4 и назначают новые допустимые варианты трассы, выполняя действия алгоритма из пп. 4–6.

В таблице приведен фрагмент сформированного множества.

Варианты допустимых проектных решений и показатели их оценки

Сдвигка, м	R, м	Длина линии, м	Прира- щение линии, м	Объем земляных работ, м ³		Перепад высот «туда», м	Перепад высот «обратно», м	d, %	Строительная стоимость, тыс. руб
				Насыпь	Выемка				
Кр. расст.	—	11 192	—	221,72	15,19	7,25	10,00	18,32	86 889,28
ВУ2.100	1000	11 230	37,74	377,04	0,00	8,97	11,44	14,69	95 066,37
ВУ2.120	1000	11 234	41,21	371,22	0,00	8,92	11,25	14,69	94 759,72
...									
ВУ2.275	1000	11 238	45,21	339,87	0,00	8,95	11,43	13,79	93 012,37
ВУ4.100	1000	11 198	5,75	386,88	0,00	9,03	12,06	19,20	95 430,78
ВУ4.120	1000	11 244	51,49	333,90	0,00	8,94	12,07	13,34	92 715,63
...									
ВУ4.297	1000	11 256	63,34	359,30	0,00	8,25	12,27	10,22	94 230,55
ВУ2+4.100	1000	11 207	14,72	386,15	0,00	8,67	11,61	18,75	95 390,77
ВУ2+4.120	1000	11 213	21,12	343,51	0,00	8,56	11,32	10,65	93 060,14
...									
ВУ2+4.310	1000	11 290	97,90	378,64	0,00	7,75	11,38	18,30	95 551,84
ВУ2.60	2000	11 193	1,35	224,87	14,06	6,25	9,25	18,30	87 012,42
ВУ2.80	2000	11 195	2,91	218,00	25,56	5,75	8,95	17,42	87 284,53
...									
ВУ2.157	2000	11 204	11,53	216,60	20,66	6,57	9,67	16,06	86 984,63
ВУ4.60	2000	11 196	3,38	216,92	20,87	5,75	8,58	16,95	86 961,03
ВУ4.80	2000	11 198	5,75	215,98	21,98	5,75	8,58	15,60	86 986,48
...									
ВУ4.192	2000	11 217	24,56	222,50	22,53	5,50	8,47	17,41	87 510,07
ВУ2+4.20	2000	11 200	7,85	223,08	17,89	4,98	7,96	17,33	87 170,35
ВУ2+4.40	2000	11 201	8,13	226,22	15,33	5,66	8,64	16,50	87 205,68
...									
ВУ2+4.140	2000	11 214	21,23	381,09	0,00	5,89	8,83	14,25	95 186,98

Заключение

Проводимый вычислительный эксперимент формирует базу данных для совершенствования математических моделей и методов решения задачи оптимального трассирования железных дорог в условиях сложного пересеченного рельефа местности.

На основе экспериментальных данных разрабатывается математическое обеспечение технологичных методов автоматического поиска оптимальной трассы. Это позволит реализовать новую проектную технологию, существенно

снижающую трудоемкость процессов ввода, обработки данных, расчета, анализа и сравнения допустимых вариантов. Внедрение технологии обеспечит проектировщиков эффективным инструментом принятия решений в минимальные сроки».

Список источников

1. Турбин И. В. Метод оптимизации положения трассы железной дороги в плане, основанный на принципах направленного поиска / И. В. Турбин // Труды МИИТа. Совершенствование методов проектирования железных дорог. — 1976. — Вып. 538. — С. 16–23.
2. Турбин И. В. Основы системы машинного трассирования на косогорных участках напряженного хода / И. В. Турбин // Труды МИИТа. Вопросы повышения качества и эффективности проектных решений железных дорог. — 1978. — Вып. 614. — С. 21–25.
3. Анисимов В. А. Численные методы выбора положения трассы на участке напряженного хода / В. А. Анисимов // Труды МИИТа. — 1982. — Вып. 715. — С. 98–107.
4. Струченков В. И. Основы теории и методы оптимизации трасс железных дорог и других линейных объектов: дис. ... д-ра техн. наук / В. И. Струченков. — М.: ВНИИ транспортного строительства, 1985. — 405 с.
5. Шейдвассер Д. М. Оптимизация трасс железных дорог на напряженных ходах / Д. М. Шейдвассер // Автоматизация проектирования объектов транспортного строительства. — М.: Транспорт, 1986. — С. 16–29.
6. Струченков В. И. Методы оптимизации трасс в САПР линейных сооружений / В. И. Струченков. — М.: СОЛОН-Пресс, 2020. — 272 с.
7. Струченков В. И. Компьютерные технологии в проектировании трасс линейных сооружений / В. И. Струченков // Российский технологический журнал. — 2017. — Т. 5. — № 1(15). — С. 29–41.
8. Карпов Д. А. Двухэтапная сплайн-аппроксимация в компьютерном проектировании трасс линейных сооружений / Д. А. Карпов, В. И. Струченков // Российский технологический журнал. — 2021. — Т. 9. — № 5. — С. 45–56. — DOI: 10.32362/2500-316X-2021-9-5-45-56.
9. Карпов Д. А. Сплайн-аппроксимация многозначных функций в проектировании трасс линейных сооружений / Д. А. Карпов, В. И. Струченков // Russ. Technol. J. — 2022. — Т. 10. — № 4. — С. 65–74. — DOI: 10.32362/2500-316X-2022-10-4-65-74.
10. Карпов Д. А. Оптимизация параметров сплайна при аппроксимации многозначных функций / Д. А. Карпов, В. И. Струченков // Russ. Technol. J. — 2023. — Т. 11. — № 2. — С. 72–83. — DOI: 10.32362/2500-316X-2023-11-2-72-83.
11. Карпов Д. А. Комбинированные алгоритмы аппроксимации для интерактивного проектирования дорожных трасс в системах автоматизированного проектирования / Д. А. Карпов, В. И. Струченков // Russ. Technol. J. — 2023. — Т. 11. — № 4. — С. 72–83. — DOI: 10.32362/2500-316X-2023-11-4-72-83.

12. Струченков В. И. Использование сплайнов сложной структуры в проектировании дорожных трасс / В. И. Струченков, Д. А. Карпов // Russ. Technol. J. — 2024. — Т. 12. — № 1. — С. 111–122. — DOI: 10.32362/2500-316X-2024-12-1-111-122.
13. Богданов А. И. Математическая модель продольного профиля трассы новых железных дорог / А. И. Богданов // Проектирование развития региональной сети железных дорог. — 2018. — № 6. — С. 12–15.
14. Богданов А. И. Математическая модель плана трассы новых железных дорог / А. И. Богданов // Проектирование развития региональной сети железных дорог. — 2019. — № 7. — С. 17–23.
15. Богданов А. И. Общая модель плана и профиля для автоматизированного проектирования новых и реконструируемых железных дорог / А. И. Богданов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2019. — № 3(63). — С. 142–148. — DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).142-148.
16. Пренинг Р. Д. О совершенствовании математических моделей и методов трассирования участков железных дорог в условиях пересеченного рельефа / Р. Д. Пренинг, Р. В. Виноградов, А. Ш. Баткаева, А. М. Лазарева // Вестник транспорта Поволжья. — 2025. — № 1(109). — С. 128–135.
17. Свид. 2025610833 Российская Федерация. Программа формирования множества вариантов трассы железной дороги на участках с пересеченным рельефом местности: заявл. 28.12.2024; опубл. 14.01.2025 / Р. Д. Пренинг, Р. В. Виноградов, А. Ш. Баткаева, А. М. Лазарева; заявитель — Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

Дата поступления: 07.07.2025

Решение о публикации: 04.08.2025

Контактная информация:

АНИСИМОВ Владимир Александрович — д-р техн. наук, доц., проф. кафедры «Изыскания и проектирование железных дорог»; anisvl@mail.ru

ПРЕНИНГ Ростислав Денисович — аспирант кафедры «Изыскания и проектирование железных дорог»; kolga139@yandex.ru

ИЛЬИН Николай Юрьевич — студент 5-го курса; nikolay.ilyin.02@mail.ru

СТРЕХНИН Глеб Андреевич — студент 5-го курса; glebstrehnin@gmail.com

Generating a Variety of Acceptable Design Solutions for Railway Alignment in Rough Terrain Conditions

V. A. Anisimov, R. D. Prening, N. Yu. Ilyin, G. A. Strehnin

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Anisimov V. A., Prening R. D., Ilyin N. Yu., Strehnin G. A. Generating a Variety of Acceptable Design Solutions for Railway Alignment in Rough Terrain Conditions. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 3, pp. 149–158. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-149-158

Summary

Purpose: To create an information basis for the modernization of existing and development of new methods for optimal railway routing in areas with difficult rough terrain. **Methods:** Mathematical modelling, optimisation methods, and decision theory were applied. **Results:** A computational experiment was conducted, its stages were determined, and an algorithm was developed for forming a set of acceptable route variants on a terrain section with a longitudinal watershed, two transverse watersheds and a ravine. **Practical significance:** A thorough examination of the experiment's outcomes reveals that the numerous viable railway route alternatives in regions with complex, rough terrain will provide a substantial information foundation for enhancing the mathematical support for the implementation of innovative technology in computer-aided railway designs. This should result in a significant reduction in the time required to make effective design decisions.

Keywords: Railway alignment, route plan, design line, rough terrain, mathematical model, optimisation methods.

References

1. Turbin I. V. Metod optimizatsii polozheniya trassy zheleznoy dorogi v plane, osnovanny na printsipakh napravlenogo poiska [Method for optimizing the position of a railway track plan based on the principles of directed search]. *Trudy MIIT* [Proceedings of MIIT]. 1976, Iss. 538, pp. 16–23. (In Russian)
2. Turbin I. V. Osnovy sistemy mashinnogo trassirovaniya na kosogornyh uchastkah napryazhennogo hoda [Fundamentals of the machine routing system on slope sections of the stressed course]. *Trudy MIIT* [Proceedings of MIIT]. 1978, Iss. 614, pp. 21–25. (In Russian)
3. Anisimov V. A. Chislennyye metody vybora polozheniya trassy na uchastke napryazhennogo hoda [Numerical methods for selecting the position of the route in the stressed course section]. *Trudy MIIT* [Proceedings of MIIT]. 1982, Iss. 715, pp. 98–107. (In Russian)
4. Struchenkov V. I. *Osnovy teorii i metody optimizatsii trass zheleznnyh dorog i drugih linejnykh ob'ektov: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Fundamentals of theory and methods for optimizing railway routes and other linear objects: dis. ... Doctor of Engineering Sciences]. Moscow: VNIITransstroy Publ., 1985, 405 p. (In Russian)
5. Sheidvasser D. M. Optimizatsiya trass zheleznnyh dorog na napryazhennykh hodakh [Optimization of railway routes on stressed courses]. *Avtomatizatsiya proektirovaniya ob'ektov transportnogo stroitel'stva* [Automation of design of transport construction objects]. Moscow: Transport Publ., 1986, pp. 16–29. (In Russian)

6. Struchenkov V. I. *Metody optimizatsii trass v SAPR lineynykh sooruzheniy* [Methods for optimizing routes in CAD of linear structures]. Moscow: SOLON-Press, 2020, 272 p. (In Russian)
7. Struchenkov V. I. Komp'yuternye tekhnologii v proektirovanii trass lineynykh sooruzheniy [Computer technologies in the design of linear structure routes]. *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal* [Russian Technological Journal]. 2017, vol. 5, Iss. 1(15), pp. 29–41. (In Russian)
8. Karpov D. A., Struchenkov V. I. Dvukhetapnaya splayn-approksimatsiya v komp'yuternom proektirovanii trass lineynykh sooruzheniy [Two-stage spline approximation in computer design of linear structure routes]. *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal* [Russian Technological Journal]. 2021, vol. 9, Iss. 5, pp. 45–56. DOI: 10.32362/2500-316X-2021-9-5-45-56. (In Russian)
9. Karpov D. A., Struchenkov V. I. *Splayn-approksimatsiya mnogoznachnykh funktsiy v proektirovanii trass lineynykh sooruzheniy* [Spline approximation of multivalued functions in the design of linear structure routes]. *Russ. Technol. J.* 2022, vol. 10, Iss. 4, pp. 65–74. DOI: 10.32362/2500-316X-2022-10-4-65-74.
10. Karpov D. A., Struchenkov V. I. *Optimizatsiya parametrov splayna pri approksimatsii mnogoznachnykh funktsiy* [Optimization of spline parameters in the approximation of multivalued functions]. *Russ. Technol. J.* 2023, vol. 11, Iss. 2, pp. 72–83. DOI: 10.32362/2500-316X-2023-11-2-72-83.
11. Karpov D. A., Struchenkov V. I. *Kombinirovannye algoritmy approksimatsii dlya interaktivnogo proektirovaniya dorozhnykh trass v sistemakh avtomatizirovannogo proektirovaniya* [Combined approximation algorithms for interactive design of road routes in CAD systems]. *Russ. Technol. J.* 2023, vol. 11, Iss. 4, pp. 72–83. DOI: 10.32362/2500-316X-2023-11-4-72-83.
12. Struchenkov V. I., Karpov D. A. *Ispol'zovanie splaynov slozhnoy struktury v proektirovanii dorozhnykh trass* [Using complex structure splines in road route design]. *Russ. Technol. J.* 2024, vol. 12, Iss. 1, pp. 111–122. DOI: 10.32362/2500-316X-2024-12-1-111-122.
13. Bogdanov A. I. Matematicheskaya model' prodol'nogo profilya trassy novykh zheleznykh dorog [Mathematical model of longitudinal profile of new railway routes]. *Proektirovanie razvitiya regional'noj seti zheleznykh dorog* [Railway Network Development Design]. 2018, Iss. 6, pp. 12–15. (In Russian)
14. Bogdanov A. I. Matematicheskaya model' plana trassy novykh zheleznykh dorog [Mathematical model of new railway routes plan]. *Proektirovanie razvitiya regional'noj seti zheleznykh dorog* [Railway Network Development Design]. 2019, Iss. 7, pp. 17–23. (In Russian)
15. Bogdanov A. I. Obshchaya model' plana i profilya dlya avtomatizirovannogo proektirovaniya novykh i rekonstruirovannykh zheleznykh dorog [General plan and profile model for automated design of new and reconstructed railways]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]. 2019, Iss. 3(63), pp. 142–148. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).142-148.
16. Prening R. D., Vinogradov R. V., Batkaeva A. Sh., Lazareva A. M. O sovershenstvovanii matematicheskikh modelej i metodov trassirovaniya uchastkov zheleznykh dorog v usloviyakh peresechyonnogo rel'efa [On improving mathematical models and methods of railway routing in rugged terrain]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Volga Transport Herald]. 2025, Iss. 1(109), pp. 128–135. (In Russian)

17. Prening R. D., Vinogradov R. V., Batkaeva A. Sh., Lazareva A. M. *Programma formirovaniya mnozhestva variantov trassy zheleznoy dorogi na uchastkakh s peresechennym rel'efom mestnosti* [Program for the formation of a set of railway route options on sections with rugged terrain]. Svidetel'stvo RF, no. 2025610833, 2025. (In Russian)

Received: July 07, 2025

Accepted: August 04, 2025

Author's information:

Vladimir A. ANISIMOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Department “Railway Survey and Design”; anisvl@mail.ru

Rostislav D. PRENING — Postgraduate Student, Department “Railway Survey and Design”; kolga139@yandex.ru

Nikolay Yu. ILYIN — 5-year Student; nikolay.ilyin.02@mail.ru

Gleb A. STREHNIN — 5-year Student; glebstrehnin@gmail.com

ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

УДК 624.152

Использование сценарного подхода при формировании комплектов строительной техники

В. С. Меркушева, Н. М. Панченко

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Меркушева В. С., Панченко Н. М. Использование сценарного подхода при формировании комплектов строительной техники // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 3. — С. 159–166. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-159-166

Аннотация

Цель: Оценить состав строительной техники при строительстве на примере процесса возведения насыпи земляного полотна экскаваторным комплексом с учетом технических и экономических характеристик. Определить состав значимых показателей для формирования комплектов строительной техники для строительства. Оценить вариативность комплектов по основным значимым показателям. **Методы:** Теории массового обслуживания, методы сценарного подхода, оценка вероятности безотказной работы техники. **Результаты:** Сформированы сценарии составления комплектов строительной техники. По всем сформированным сценариям рассчитаны вероятности безотказной работы техники, математического ожидания производительности техники и определена их стоимость. **Практическая значимость:** Полученные сценарии упрощают и сокращают время на принятие управленческого решения о формировании комплектов строительной техники.

Ключевые слова: Вероятность безотказной работы, математического ожидания производительности, сценарный подход, средняя стоимость, надежность, строительный процесс, комплекты строительной техники.

При строительстве любых объектов всегда актуальны следующие условия: высокая производительность строительных процессов, оптимальные сроки ввода объекта в эксплуатацию и скорейшее получение прибыли от введенного в строй объекта. Все эти условия тесно взаимосвязаны между собой и напрямую зависят от надежности функционирования строительных процессов [1]. Надежность функционирования, в свою очередь, зависит от используемой технологии и надежности элементов данного процесса: рабочей силы и техники и, как правило, не учитывается при составлении нормативной документации, на основании которой рассчитываются производительность строительных процессов и сроки ввода объекта в эксплуатацию. Все эти характеристики влияют на принятие решения по формированию комплектов строительной техники [2].

Предлагаем провести исследование влияния технологий и надежности элементов на принятие решений по формированию комплектов строительной техники и функционированию строительного процесса — возведению насыпи земляного полотна экскаваторным комплексом. В комплект входят:

- экскаватор JCB $q = 1 \text{ м}^3$;
- самосвалы КАМАЗ-43255, $q = 7 \text{ т}$;
- бульдозер гусеничный Б-100;
- каток пневмоколесный Hitachi CP-210.

Условия функционирования процесса следующие: грунт разрабатывается экскаватором в карьере и доставляется самосвалами к месту отсыпки, где на разных захватках производится разравнивание грунта бульдозером и уплотнение пневмоколесным катком.

Графическая модель данного процесса, на основе которой будет производиться расчет, показана на рис. 1. Модель отображает структуру процесса, в которой представлены все элементы (рабочая сила и техника), а также их взаимодействие в технологическом процессе [3]. Количество техники в экскаваторном комплексе определено путем использования математического аппарата теории массового обслуживания и является оптимальным для расстояния дальности возки грунта, равного $L = 0,3\text{--}0,5 \text{ км}$ [4].

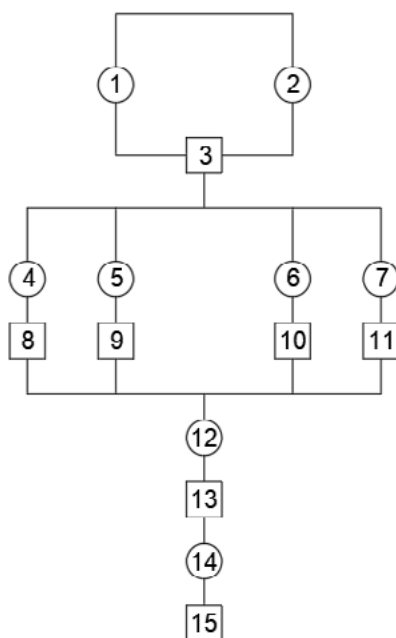


Рис. 1. Графическая модель процесса возведения насыпи земляного полотна экскаваторным комплексом:

- 1 — машинист экскаватора; 2 — помощник машиниста экскаватора;
 3 — экскаватор; 4–7 — шоферы автосамосвалов; 8–11 — автосамосвалы;
 12 — машинист бульдозера; 13 — бульдозер; 14 — машинист уплотняющей техники; 15 — уплотняющая техника

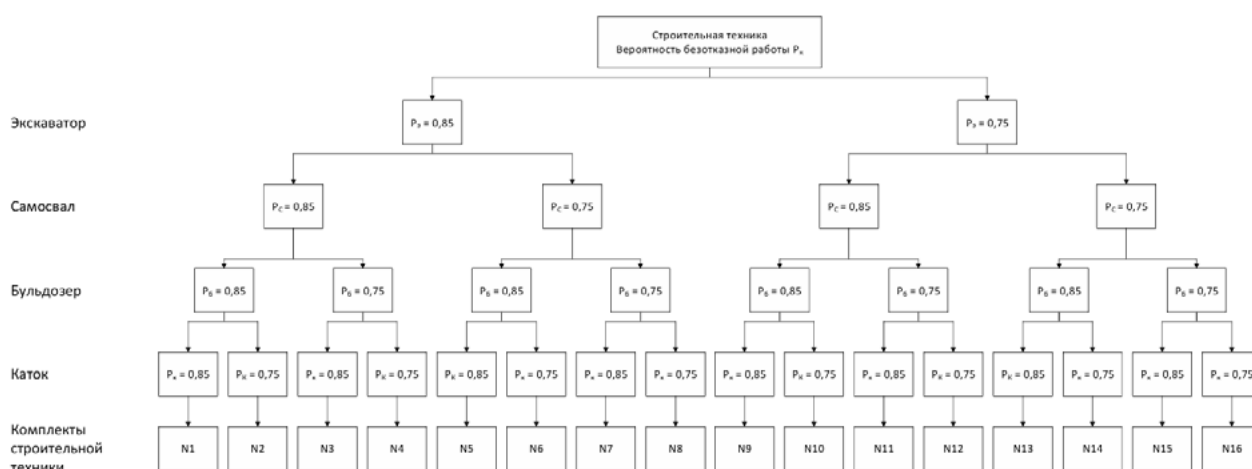


Рис. 2. Математическая модель функционирования процесса возведения насыпи земляного полотна экскаваторным комплексом

Техника, входящая в экскаваторный комплекс, может быть как абсолютно новая, так и многократно использованная для данного вида работ, а следовательно, вероятность безотказной работы у нее также будет разная. По статистическим данным, собранным для строительной отрасли, вероятность безотказной работы новой техники составляет $P = 0,85$, а вероятность безотказной работы рабочих в возрасте до 30 лет составляет $P = 0,95$.

Определим вероятность безотказной работы комплекса строительной техники, состоящей из экскаватора, самосвала, бульдозера и катка [5]. Кроме того, определим, как влияет вероятность безотказной работы той или иной конкретной машины на производительность данного строительного процесса в целом. Для этого создадим модель функционирования данного процесса методом «сценариев», которая представлена на рис. 2. Данная модель дает представление о 16 сценариях функционирования строительного процесса [6]. Каждый сценарий включает комбинацию новой техники и техники с износом (далее — старой техники).

Используя сценарный подход к составлению комплекта строительной техники, рассчитаем вероятность безотказной работы по каждому варианту. Результаты расчета приведены в табл. 1.

Строительные процессы в целом обладают невысокой вероятностью безотказной работы за счет своих структурных связей, в которых преобладают последовательные соединения технологических операций [7]. Поэтому в проведенных расчетах значения вероятностей безотказной работы невысокие. Например, комплект № 1, состоящий только из новой техники, на 40,4 % превосходит по вероятности безотказной работы комплект № 16, целиком состоящий из подержанной техники. В зависимости от компоновки комплектов техникой этот процент уменьшается до 7,7 % (комплект № 5). В результате рассмотрения 16 сценариев комплектности строительной техники разброс вероятностей безотказной работы получился достаточно большой — от 7,7 % до 40,4 %.

ТАБЛИЦА 1. Вероятности безотказной работы комплектов строительной техники согласно математической модели функционирования производственного процесса

Номер комплекта	Вероятность безотказной работы	Номер комплекта	Вероятность безотказной работы
№ 1	0,52	№ 9	0,46
№ 2	0,46	№ 10	0,41
№ 3	0,46	№ 11	0,41
№ 4	0,41	№ 12	0,36
№ 5	0,48	№ 13	0,41
№ 6	0,41	№ 14	0,36
№ 7	0,47	№ 15	0,31
№ 8	0,36	№ 16	0,31

ТАБЛИЦА 2. Математическое ожидание производительности комплектов строительной техники согласно математической модели функционирования производственного процесса

Номер комплекта	Математическое ожидание производительности, %	Номер комплекта	Математическое ожидание производительности, %
№ 1	61	№ 9	56,8
№ 2	58,4	№ 10	54,3
№ 3	58,4	№ 11	54,3
№ 4	56	№ 12	52
№ 5	59,4	№ 13	57
№ 6	59,1	№ 14	54,9
№ 7	59,1	№ 15	54,9
№ 8	57	№ 16	52,9

Было определено, что вероятность безотказной работы техники влияет на производительность строительных работ для выбранных 16 сценариев компоновки техники с результатами, приведенными в табл. 2.

Математическое ожидание производительности комплекта по сценарию № 1 (полностью новая техника) составляет 61 % от максимально возможного. Такой невысокий показатель вызван большим количеством последовательно связанных между собой операций и малым количеством параллельных [8], что снижает надежность процессов и, следовательно, их производительность. Как показывает таблица, математическое ожидание производительности комплекта № 16 (с изношенной техникой) на 8,1 % ниже показателя комплекта № 1.

Полученные результаты расчетов показывают реальную ситуацию по ожиданию производительности экскаваторных комплектов с учетом надежности конкретных машин и их расположения в структуре технологического процесса. Результаты расчетов дают возможность оценить ожидание производительности экскаваторных комплексов, а при известных объемах работ заказчик может оценить и реальные сроки их выполнения.

ТАБЛИЦА 3. Стоимости новой и изношенной строительной техники

Экскаватор		Самосвал		Бульдозер		Каток	
Стоимость, руб.							
с износом	новая	с износом	новая	с износом	новая	с износом	новая
7 млн	16,5 млн	5,7 млн	16 млн	4 млн	70 млн	11,5 млн	60 млн

ТАБЛИЦА 4. Стоимость комплектов строительной техники согласно математической модели функционирования производственного процесса

Номер комплекта	Стоимость, млн руб.	Номер комплекта	Стоимость, млн руб.
№ 1	162,5	№ 9	153
№ 2	114	№ 10	104,5
№ 3	96,5	№ 11	87
№ 4	48	№ 12	38,5
№ 5	152,2	№ 13	142,7
№ 6	103,7	№ 14	94,2
№ 7	86,2	№ 15	76,7
№ 8	37,7	№ 16	28,2

Принятие решений при расчете вероятности безотказной работы комплекса строительной техники в целом является важной составной частью строительного процесса, но также необходимо руководствоваться не только техническими характеристиками, но и экономическими [9]. В современных условиях нужно исходить не только из надежности строительной техники, но и учитывать экономические характеристики, например — инвестиции в строительную технику. На базе сценарного подхода [10] для определения вероятности безотказной работы строительной техники нами была определена также экономическая составляющая принятия решения по использованию комплекта строительной техники, а именно — стоимость комплектов. В табл. 3 представлены расчетные данные: стоимости новой и бывшей в употреблении техники с учетом износа.

В табл. 4 представлены результаты определения стоимости 16 сценариев комплектов строительной техники.

В результате расчетов мы получили среднюю стоимость для всех 16 сценариев компоновки комплектов техники. Так, например, для комплекта № 1 (полностью новой техники) средняя стоимость будет соответствовать 162,5 млн руб. при средней вероятности безотказной работы $P = 0,85$, а средняя стоимость техники для комплекта № 16 (старой техники) составляет 28,20 млн руб. при средней вероятности безотказной работы $P = 0,75$.

При принятии управленческого решения о формировании комплектов строительной техники для строительных работ необходимо учитывать не только технические характеристики, но также и ценовые показатели применяемой техники.

Выводы

Полученные результаты будут полезны строительным организациям, особенно небольшим, которым сложно содержать большой парк техники и создавать резервные фонды для ее дублирования. Опираясь на знание фактического состояния своей техники, руководитель строительной организации легко может найти из предложенных шестнадцати сценариев формирования комплектов техники тот, который наиболее приближен к его конкретной ситуации. На основе предложенного подхода к учету надежности, производительности и стоимости техники руководитель способен принимать обоснованные решения при формировании строительных комплектов.

Список источников

1. Гусаков А. А. Организационно-технологическая надежность строительства / А. А. Гусаков, А. В. Гинзбург, С. А. Веремеенко. — М.: А/О «Внешторгиздат», 1994. — 472 с.
2. Половко А. М. Основы теории надежности / А. М. Половко, С. В. Гуров. — СПб.: БХВ-Петербург, 2008. — 704 с.
3. Панченко Н. М. К вопросу оценки качества функционирования технологических процессов в строительстве через их производительность и сроки выполнения работ / Н. М. Панченко // Тенденции развития науки и образования. — 2021. — № 78, ч. 2. — С. 90–93.
4. Панченко Н. М. Выбор рационального сочетания землеройной и транспортной техники при производстве земляных работ / Н. М. Панченко // Тенденции развития науки и образования. — 2022. — № 87, ч. 3. — С. 70–74.
5. Дроздова Н. В. Экономико-математическое моделирование / Н. В. Дроздова. — Ярославль: ЯрГУ, 2010. — 246 с.
6. Катарыгин Н. В. Экономико-математическое моделирование / Н. В. Катарыгин. — СПб.: Лань, 2022. — 256 с.
7. Мошков М. Ю. Деревья решений. Теория и приложения / М. Ю. Мошков. — Нижний Новгород, 1994. — 176 с.
8. Интрилигатор М. Математические методы оптимизации и экономическая теория / М. Интрилигатор. — М.: Айрис-Пресс, 2002. — 576 с.
9. Глухов В. В. Математические методы и модели для менеджмента / В. В. Глухов, М. Д. Медников, С. Б. Коробко. — СПб.: Лань, 2000. — 528 с.
10. Акулич И. Л. Математическое программирование в примерах и задачах / И. Л. Акулич. — СПб.: Лань, 2011. — 352 с.

Дата поступления: 06.06.2025

Решение о публикации: 12.07.2025

Контактная информация:

МЕРКУШЕВА Виктория Сергеевна — канд. экон. наук, доц.; vika.merkusheva@bk.ru

ПАНЧЕНКО Наталия Михайловна — канд. техн. наук, доц.; panchnat@rambler.ru

A Scenario Approach to Construction Equipment Selection

V. S. Merkusheva, N. M. Panchenko

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Merkusheva V. S., Panchenko N. M. A Scenario Approach to Construction Equipment Selection. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 3, pp. 159–166. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-159-166

Summary

Purpose: To evaluate the type of construction equipment used in the construction of a railway track embankment with excavator units, taking into account their technical and economic characteristics. To ascertain the key indicators for the construction equipment selection. To evaluate the variability of the construction equipment components according to the key indicators. **Methods:** Queuing theory, scenario approach methods, estimation of probability of the equipment failure-free operation. **Results:** The formulation of scenarios for the construction of equipment has been completed. For all scenarios that were generated, the probabilities of failure-free operation of the equipment, the mathematical expectations of the equipment's performance and the equipment's cost have been calculated. **Practical significance:** The scenarios obtained will serve to simplify and reduce the time required to make a management decision on the selection of the construction equipment.

Keywords: Probability of failure-free operation, mathematical expectation of performance, scenario approach, average cost, reliability, construction process, construction equipment sets.

References

1. Gusakov A. A., Ginzburg A. V., Veremeenko S. A. *Organizatsionno-tekhnologicheskaya nadezhnost' stroitel'stva* [Organizational and technological reliability of construction]. Moscow: AO "Vneshtorgizdat" Publ., 1994, 472 p. (In Russian)
2. Polovko A. M., Gurov S. V. *Osnovy teorii nadezhnosti* [Fundamentals of reliability theory]. Saint Petersburg: BHV-Peterburg Publ., 2008, 704 p. (In Russian)
3. Panchenko N. M. K voprosu otsenki kachestva funktsionirovaniya tekhnologicheskikh protsessov v stroitel'stve cherez ikh proizvoditel'nost' i sroki vypolneniya rabot [On the issue of assessing the quality of functioning of technological processes in construction through their productivity and deadlines for work performance]. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya* [Trends in the development of science and education]. 2021, Iss. 78, part 2, pp. 90–93. (In Russian)
4. Panchenko N. M. Vybór ratsional'nogo sochetaniya zemleroy noy i transportnoy tekhniki pri proizvodstve zemlyanykh rabot [Selection of a rational combination of earthmoving and transport equipment in earthworks]. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya* [Trends in the development of science and education]. 2022, Iss. 87, part 3, pp. 70–74. (In Russian)
5. Drozdova N. V. *Ekonomiko-matematicheskoe modelirovaniye* [Economic and mathematical modeling]. Yaroslavl': YarGU Publ., 2010, 246 p. (In Russian)
6. Katarygin N. V. *Ekonomiko-matematicheskoe modelirovaniye* [Economic and mathematical modeling]. Saint Petersburg: Lan' Publ., 2022, 256 p. (In Russian)

7. Moshkov M. Yu. *Derev'ya resheniy. Teoriya i prilozheniya* [Decision trees. Theory and applications]. Nizhny Novgorod, 1994, 176 p. (In Russian)
8. Intriligator M. *Matematicheskie metody optimizatsii i ekonomicheskaya teoriya* [Mathematical methods of optimization and economic theory]. Moscow: Ayris-Press Publ., 2002, 576 p. (In Russian)
9. Glukhov V. V., Mednikov M. D., Korobko S. B. *Matematicheskie metody i modeli dlya menedzhmenta* [Mathematical methods and models for management]. Saint Petersburg: Lan' Publ., 2000, 528 p. (In Russian)
10. Akulich I. L. *Matematicheskoe programmirovaniye v primerakh i zadachakh* [Mathematical programming in examples and problems]. Saint Petersburg: Lan' Publ., 2011, 352 p. (In Russian)

Received: June 06, 2025

Accepted: July 12, 2025

Author's information:

Victoria S. MERKUSHEVA — PhD in Economics, Associate Professor; vika.merkusheva@bk.ru

Natalia M. PANCHENKO — PhD in Engineering, Associate Professor; panchnat@rambler.ru

УДК 625.1

Влияние надежности элементов строительного процесса на сроки строительства

Н. М. Панченко, Д. А. Басовский

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Панченко Н. М., Басовский Д. А. Влияние надежности элементов строительного процесса на сроки строительства // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 3. — С. 167–175. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-167-175

Аннотация

Цель: Оценить влияние, которое оказывает надежность рабочих и техники, принимающих участие в строительных процессах, на производительность этих процессов и, как следствие, на сроки строительства. Показать закономерности выявленного влияния на примере типовых комплектов строительной техники для возможности использования полученных результатов руководителями строительных организаций. **Методы:** Исследуемый строительный процесс был представлен в виде структурной модели, которая отражала количественные и качественные характеристики процесса. В качестве математического аппарата использовались формулы теории больших систем, теории массового обслуживания, теории надежности, теории вероятности. **Результаты:** Построена структурная модель строительного процесса, на основе которой произведены расчеты производительности и сроков выполнения работ с учетом надежности элементов данного строительного процесса. На основе расчетов построены графические зависимости производительности и сроков выполнения работ с учетом надежности для типовых экскаваторных комплектов строительной техники с наиболее часто используемыми объемами ковшей. При помощи графических зависимостей выявлено и оценено влияние надежности элементов строительного процесса на сроки строительных работ. **Практическая значимость:** Руководитель любой строительной организации заинтересован в том, чтобы строительные процессы, за которые он отвечает, выполнялись качественно и в срок. Современная нормативная документация не учитывает влияние, которое оказывает надежность элементов строительного процесса на его сроки выполнения. Представленные в статье расчеты сведены в таблицы, которыми удобно пользоваться. Графические зависимости дают наглядное представление о влиянии надежности элементов строительного процесса на его сроки выполнения. Комплекты, рассмотренные в исследовании, — типовые, а объем грунта, для разработки которого рассчитаны сроки выполнения работ, универсален для трансформации. Зная свой парк машин и фронт работ, воспользовавшись результатами исследования, руководитель строительной организации может оценить реальные сроки выполнения работ с учетом надежности и при необходимости скорректировать их.

Ключевые слова: Производительность, технологический процесс, вероятность безотказной работы, надежность, структурная модель, сроки производства работ.

Показателями качества любого строительного процесса являются: надежность функционирования данного процесса, высокая производительность и соблюдение расчетных сроков его завершения. В свою очередь, на представленные показатели оказывает огромное влияние применяемая технология производства работ. В зависимости от используемой технологии мы имеем определенную структуру строительного процесса [1]. Рассмотрим влияние надежности элементов строительного процесса на сроки строительства на примере экскаваторного комплекта,

который производит разработку грунта в карьере экскаватором с емкостью ковша $q = 1 \text{ м}^3$, $q = 1,25 \text{ м}^3$, $q = 1,5 \text{ м}^3$ и транспортировку разработанного грунта автосамосвалами грузоподъемностью 7 т при различных дальностях транспортирования грунта.

Используем системный подход и основы моделирования для исследования данного строительного процесса. Создадим структурную модель строительного процесса в общем виде [2]. На рис. 1 представлена структурная модель строительного процесса разработки грунта в карьере экскаватором и транспортирования его самосвалами к месту отсыпки в общем виде. Кругами в модели показаны рабочие, управляющие техникой, прямоугольниками — техника, линии, их соединяющие, — это структурные связи между элементами процесса (рабочими и техникой). В зависимости от расстояния и дальности возки грунта количество автосамосвалов и шоферов, ими управляющих, будет изменяться. Для качественного функционирования строительного процесса требуется знать оптимальное количество автосамосвалов. Оно рассчитывается с использованием формул математического аппарата теории массового обслуживания [3]. Каждому расстоянию возки грунта соответствует определенное количество автосамосвалов с учетом оптимального простоя техники во время ожидания очереди при транспортировке грунта и погрузочно-разгрузочных работах. Поэтому, для того чтобы не изображать n -ное количество аналогичных моделей для разных расстояний возки грунта, представим модель в общем виде и будем ею пользоваться с учетом изменяющегося в ней количества автосамосвалов и шоферов [4].

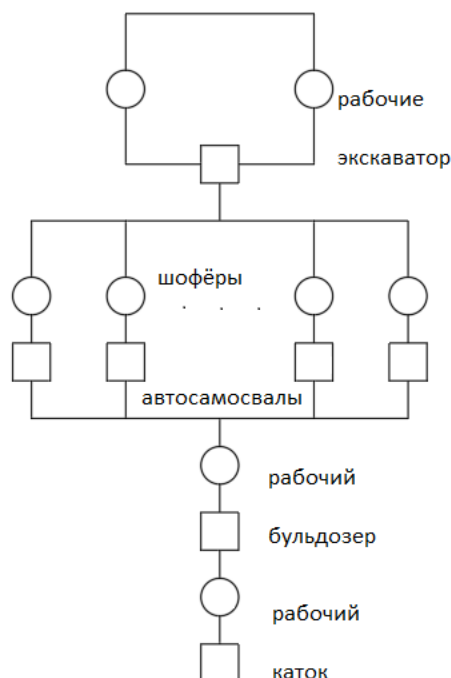


Рис. 1. Структурная модель строительного процесса разработки грунта в карьере экскаватором и транспортирования его автосамосвалами к месту отсыпки в общем виде

Каждый элемент строительного процесса имеет свою вероятность безотказной работы [5].

Рассчитаем производительность исследуемого процесса в долях условной единицы в диапазоне вероятностей безотказной работы элементов строительного процесса (рабочих и техники). Примем минимальной вероятность безотказной работы элементов строительного процесса (рабочих и техники) равной $P = 0,75$, так как при более низком показателе функционирование строительных процессов становится неэффективным в силу резкого снижения их производительности. Максимальной примем вероятность безотказной работы рабочих $P = 0,95$ и техники $P = 0,85$ согласно статистическим данным, собранным в строительной отрасли. Для расчетов воспользуемся математическим аппаратом решения больших систем академика А. Н. Колмогорова как наиболее достоверным для строительных систем [6]. Результаты расчета представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Производительность процесса разработки грунта в карьере экскаваторными комплектами $q = 1\text{--}1,5 \text{ м}^3$ при дальностях возки грунта $L = 0,3\text{--}2,0 \text{ км}$

q, м³	Дальность возки грунта, км									
	0,3		0,5		1,0		1,5		2,0	
	Производительность процесса при min и max вероятности безотказной работы элементов процесса									
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
1,0	0,679	0,756	0,693	0,765	0,701	0,771	0,712	0,781	0,719	0,787
1,25	0,849	0,945	0,849	0,945	0,866	0,957	0,876	0,964	0,890	0,977
1,5	1,019	1,134	1,019	1,134	1,052	1,157	1,068	1,172	1,079	1,181

По полученным данным построим графические зависимости. На рис. 2 и 3 представлены графические зависимости производительности исследуемого строительного процесса в долях условной единицы от расстояния дальности возки грунта с учетом надежности элементов, задействованных в данном процессе.

Анализируя полученные графические зависимости, можно оценить влияние изменения вероятности безотказной работы, а именно надежности элементов, задействованных в строительном процессе, на производительность самого строительного процесса при использовании экскаваторов с различной емкостью ковша. Во-первых, кривые имеют нелинейный характер [7]. Во-вторых, можно заметить, что производительность процесса по разработке грунта экскаватором в карьере и транспортировке его к месту отвала при малых дальностях транспортировки грунта $L = 0,3\text{--}0,5 \text{ км}$ колеблется в пределах 10 % при изменении вероятности безотказной работы элементов процесса P от min к max, а при дальностях транспортировки грунта до $L = 2,0 \text{ км}$ — эти колебания в пределах 8 %.

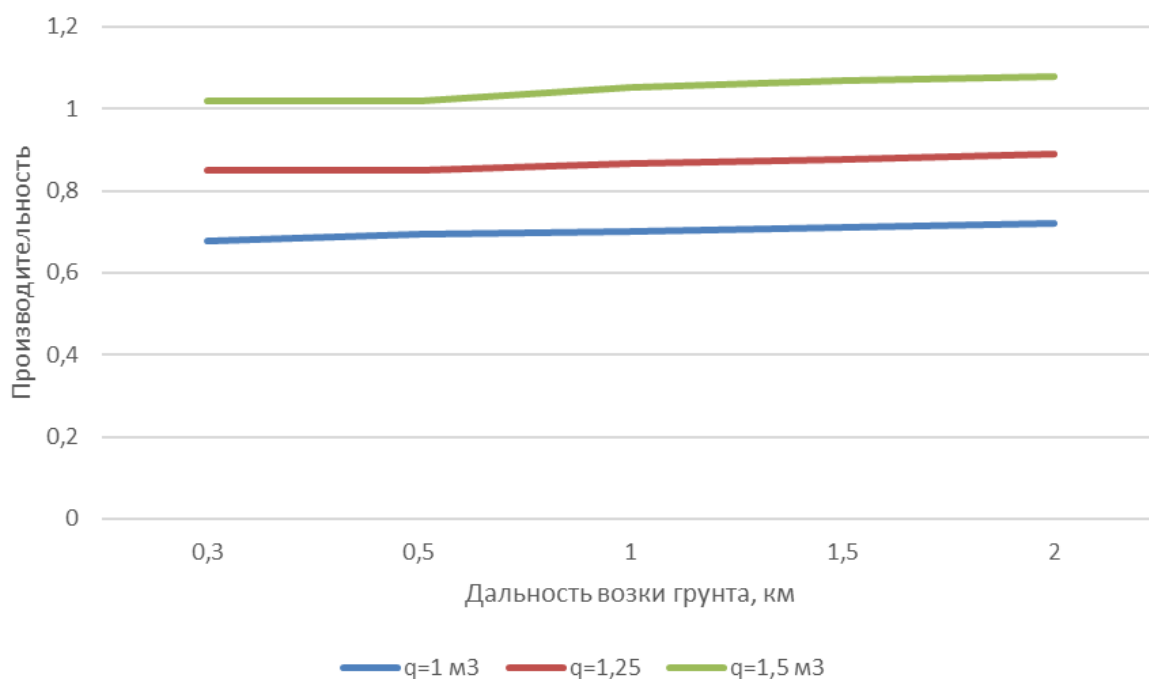


Рис. 2. Зависимость производительности процесса разработки грунта в карьере экскаваторным комплектом от расстояния дальности возки грунта с учетом минимальной вероятности безотказной работы техники и рабочих $P = 0,75$ для экскаваторов с емкостью ковша $q = 1 \text{ м}^3$, $q = 1,25 \text{ м}^3$, $q = 1,5 \text{ м}^3$

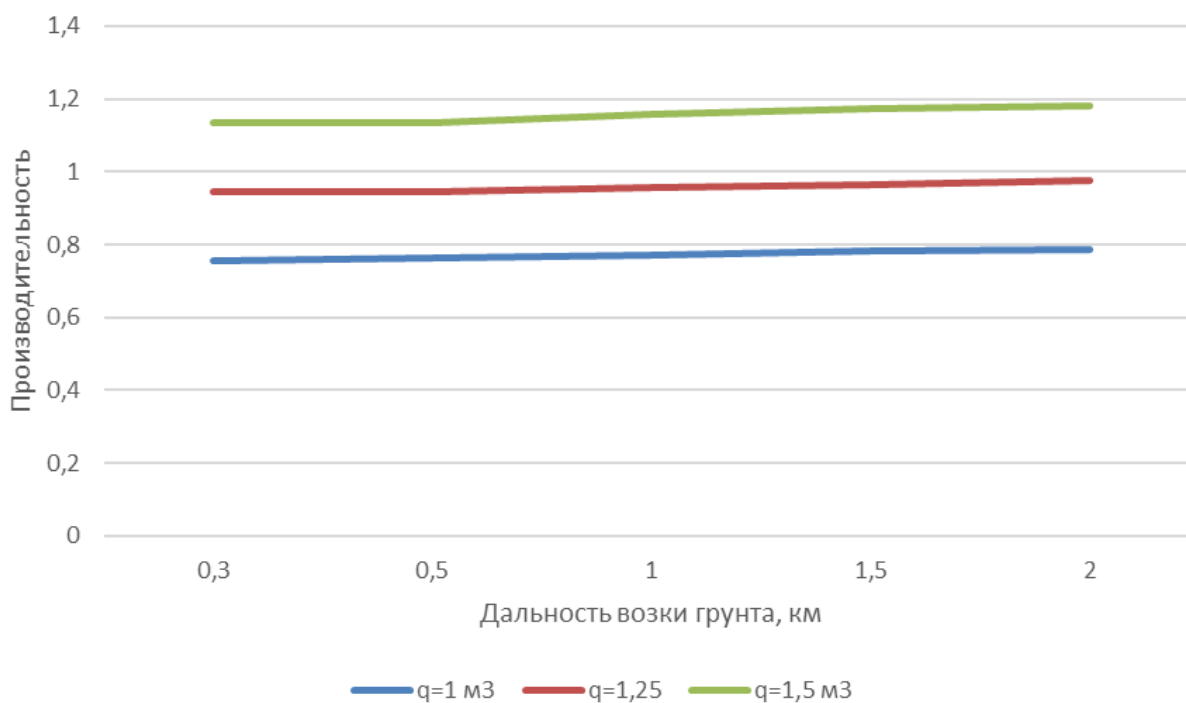


Рис. 3. Зависимость производительности процесса разработки грунта в карьере экскаваторным комплектом от расстояния дальности возки грунта с учетом максимальной вероятности безотказной работы техники $P = 0,85$ и рабочих $P = 0,95$ для экскаваторов с емкостью ковша $q = 1 \text{ м}^3$, $q = 1,25 \text{ м}^3$, $q = 1,5 \text{ м}^3$

Очевидно, что сроки производства работ напрямую зависят от производительности строительного процесса. Поэтому, зная производительность, определим сроки производства работ для исследуемого строительного процесса с заданной техникой в зависимости от вероятности безотказной работы элементов этого процесса [8]. Расчет сроков выполним для разработки грунта экскаваторными комплектами объемом $10\,000\text{ м}^3$. Результаты расчета представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Сроки производства работ при разработке грунта в карьере экскаваторными комплектами $q = 1\text{--}1,5\text{ м}^3$ при дальностях возки грунта $L = 0,3\text{--}2,0\text{ км}$

$q, \text{ м}^3$	Дальность возки грунта, км									
	0,3		0,5		1,0		1,5		2,0	
	Сроки производства работ при min и max вероятности безотказной работы элементов процесса									
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
1,0	14	11	14	11	14	11	13	11	13	11
1,25	11	9	11	9	11	9	11	9	10	9
1,5	9	7	9	7	9	7	9	7	8	7

Построим по полученным данным графические зависимости. На рис. 4 и 5 приведены зависимости сроков производства работ анализируемого процесса с учетом влияния надежности элементов, задействованных в данном процессе.

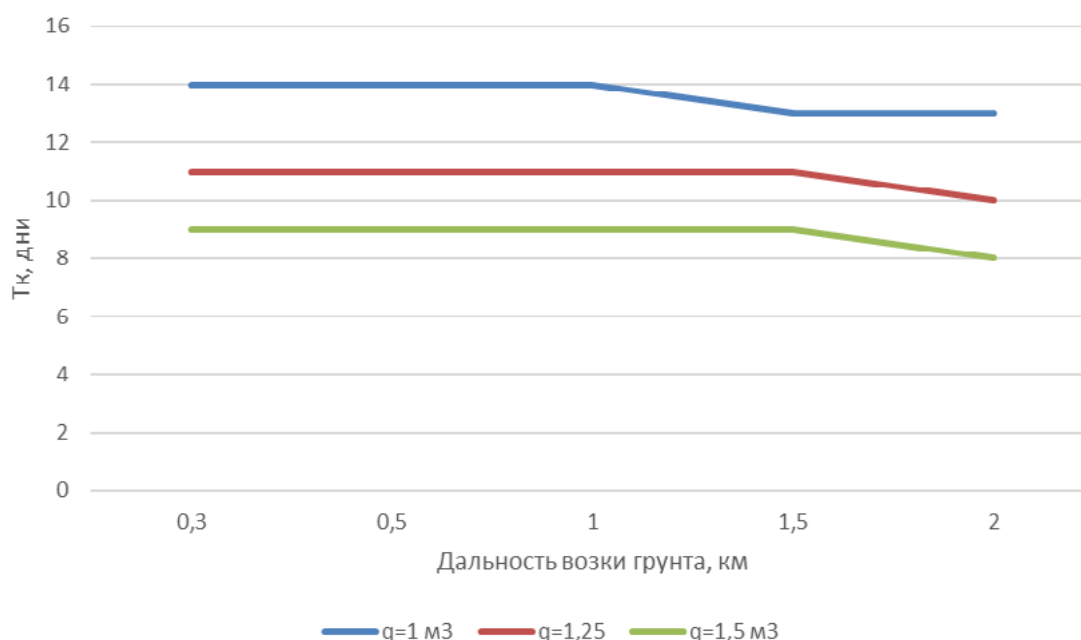


Рис. 4. Зависимость сроков производства работ процесса разработки грунта в карьере экскаваторным комплектом с учетом минимальной вероятности безотказной работы техники и рабочих $P = 0,75$ для экскаваторов с емкостью ковша $q = 1\text{ м}^3$, $q = 1,25\text{ м}^3$, $q = 1,5\text{ м}^3$ (на $V = 10\,000\text{ м}^3$)

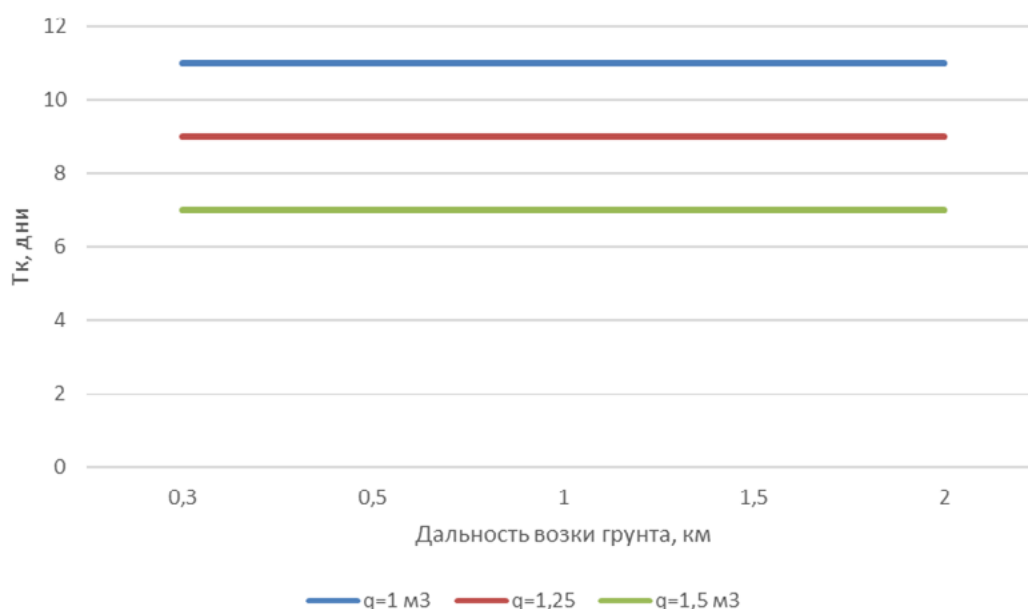


Рис. 5. Зависимость сроков производства работ процесса разработки грунта в карьере экскаваторным комплектом с учетом максимальной вероятности безотказной работы техники $P = 0,85$ и рабочих $P = 0,95$ для экскаваторов с емкостью ковша $q = 1 \text{ м}^3$, $q = 1,25 \text{ м}^3$, $q = 1,5 \text{ м}^3$ (на $V = 10\,000 \text{ м}^3$)

При минимальной вероятности безотказной работы людей и техники построенные зависимости имеют нелинейный характер, и с увеличением дальности возки грунта с 0,3 до 2,0 км можно наблюдать изменение, а именно снижение сроков производства работ на 7,1 %, 9 % и 11 % для экскаваторов с емкостью ковша $q = 1 \text{ м}^3$, $q = 1,25 \text{ м}^3$, $q = 1,5 \text{ м}^3$ соответственно. Это объясняется увеличением надежности самого процесса за счет резервирования самосвалов при увеличении дальности возки грунта [9].

При максимальной вероятности безотказной работы людей и техники построенные зависимости получились не только линейными, но еще и сроки постоянны по своим значениям [10]. Это свидетельствует о том, что при максимальной вероятности безотказной работы элементов строительного процесса резервирование техники не оказывает влияние на изменение сроков производства работ.

Вывод: все строительные процессы носят вероятностный характер, обладают свойствами и признаками больших систем и подчиняются закономерностям теории вероятности. К сожалению, нормативная документация, применяемая в строительстве, не учитывает вероятностный характер строительных процессов. Отсюда возникают сбои в процессах и несоответствие расчетных сроков строительства фактическим. Проведенное исследование на примере представленных графических зависимостей наглядно показывает, какое влияние оказывает изменение надежности элементов строительного процесса на производительность этого процесса и сроки производства работ. Расчеты выполнены для линейки типовой строительной техники и стандартного строительного процесса, который

применим при возведении любого объекта, где требуется выполнение земляных работ. Полученные результаты могут иметь практическую значимость для руководителей строительных организаций. Любой руководитель строительной организации, зная состав и состояние технической базы и персонала, сможет легко оценить производительность и сроки выполнения конкретных работ с учетом надежности при использовании представленных графических зависимостей.

Список источников

1. Губинский А. И. Надежность и качество функционирования эргатических систем / А. И. Губинский. — Л.: Наука, 1982. — 262 с.
2. Гусаков А. А. Моделирование организационно-технологической надежности строительства / А. А. Гусаков, Ю. Б. Монфред, Б. В. Прыкин. — М.: SVR-Аргус, 1994. — 472 с.
3. Соболев В. И. Экономико-математическое моделирование организации строительных работ / В. И. Соболев, В. В. Соболев // Научная мысль Кавказа: сб. тр. / Сев.-Кавк. науч. центр высш. шк. — Ростов-на-Дону, 2002. — С. 85–90.
4. Панченко Н. М. К вопросу выбора наиболее рационального сочетания землеройной и транспортной техники при производстве земляных работ / Н. М. Панченко, Д. А. Басовский // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — № 1. — С. 19–25.
5. Половко А. М. Основы теории надежности / А. М. Половко, С. В. Гуров. — СПб.: БХВ-Петербург, 2008. — 704 с.
6. Гусаков А. А. Организационно-технологическая надежность строительства / А. А. Гусаков, А. В. Гинзбург, С. А. Веремеенко. — М.: А/О «Внешторгиздат», 1994. — 472 с.
7. Спиридонов Э. С. Научные основы оптимизации организации и управления комплексом работ по переустройству транспортных объектов / Э. С. Спиридонов, А. В. Максимов. — М.: Известия, 1998. — 290 с.
8. Соболев В. И. Совершенствование организационно-технологического проектирования строительного производства: монография / В. И. Соболев; Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. — Новочеркасск, 2001. — С. 86–96.
9. Панченко Н. М. К вопросу оценки качества функционирования технологических процессов в строительстве через их производительность и сроки выполнения работ / Н. М. Панченко // Тенденции развития науки и образования: рец. науч. журн. — Самара, 2021. — № 78, ч. 2. — С. 90–93.
10. Панченко Н. М. Выбор рационального сочетания землеройной и транспортной техники при производстве земляных работ / Н. М. Панченко // Тенденции развития науки и образования: рец. науч. журн. — Самара, 2022. — № 87, ч. 3. — С. 70–74.

Дата поступления: 06.06.2025

Решение о публикации: 12.07.2025

Контактная информация:

ПАНЧЕНКО Наталия Михайловна — канд. техн. наук, доц.; panchnat@rambler.ru

БАСОВСКИЙ Дмитрий Аркадьевич — канд. техн. наук, доц.; basovskiy76@mail.ru

The Influence of the Reliability of the Construction Process Components on the Construction Time

N. M. Panchenko, D. A. Basovskiy

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Panchenko N. M., Basovskiy D. A. The Influence of the Reliability of Construction Process Components on the Construction Time. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 3, pp. 167–175. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-167-175

Summary

Purpose: To assess how the reliability of workers and equipment involved in construction processes influences the productivity of these processes and, consequently, construction time. To identify and demonstrate the identified patterns of influence using standard sets of construction equipment. This will enable construction organization managers to use the results obtained. **Methods:** The construction process under study was presented in the form of a structural model that reflected the quantitative and qualitative characteristics of the process. Formulas from the theory of large systems, queuing theory, reliability theory, and probability theory were utilized as mathematical instruments. **Results:** A structural model of the construction process was developed, providing a foundation for calculations that assessed productivity and the timeframe for completing construction work. These calculations incorporated a reliability assessment of the components involved in the construction process. A series of calculations was conducted to establish graphical dependencies between productivity and work completion time. These calculations were made based on the reliability of typical construction excavator units with the most commonly used bucket sizes. The present study employs graphical dependencies to identify and assess the influence of the reliability of construction process elements on the timing of construction work. **Practical significance:** The construction manager's primary objective is to execute construction processes with optimal quality and on schedule. The present regulatory documentation does not take into account the impact of construction component reliability on project completion time. The calculations presented in the article are conveniently summarized in tables. The utilization of graphic dependencies provides a clear visual representation of the influence of the reliability of the construction project components on its completion time. The components under consideration are considered to be standard, and the soil excavation volume is completed within a standard timeframe and is universally applicable for transformation. Given the construction manager's expertise in his machine fleet and the project's scope, the study's findings can be utilized to accurately predict the project's completion deadlines, ensuring reliability. Should further modifications be required, they can be made.

Keywords: Productivity/performance, technological process, probability of failure-free operation, reliability, structural model, construction work timeframe.

References

1. Gubinskiy A. I. *Nadezhnost' i kachestvo funktsionirovaniya ergaticheskikh sistem* [Reliability and quality of functioning of ergonomic systems]. Leningrad: Nauka Publ., 1982, 262 p. (In Russian)
2. Gusakov A. A., Monfred Yu. B., Prykin B. V. *Modelirovanie organizatsionno-tekhnologicheskoy nadezhnosti stroitel'stva* [Modeling of organizational and technological reliability of construction]. Moscow: SVR-Argus Publ., 1994, 472 p. (In Russian)
3. Sobolev V. I., Sobolev V. V. *Ekonomiko-matematicheskoe modelirovanie organizatsii stroitel'nykh rabot* [Economic and mathematical modeling of construction organization]. *Nauchnaya mysl'*

Kavkaza: sb. tr. [Scientific thought of the Caucasus: collection of works]. Rostov-on-Don: Sev.-Kavk. nauch. tsentr vyssh. shk. Publ., 2002, pp. 85–90. (In Russian)

4. Panchenko N. M., Basovskiy D. A. K voprosu vybora naibolee ratsional'nogo sochetaniya zemleroynoy i transportnoy tekhniki pri proizvodstve zemlyanykh rabot [On the issue of choosing the most rational combination of earthmoving and transport equipment in earthworks]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of research results]. 2023, Iss. 1, pp. 19–25. (In Russian)

5. Polovko A. M., Gurov S. V. *Osnovy teorii nadezhnosti* [Fundamentals of reliability theory]. Saint Petersburg: BHV-Peterburg Publ., 2008, 704 p. (In Russian)

6. Gusakov A. A., Ginzburg A. V., Veremeenko S. A. *Organizatsionno-tekhnologicheskaya nadezhnost' stroitel'stva* [Organizational and technological reliability of construction]. Moscow: AO "Vneshtorgizdat" Publ., 1994, 472 p. (In Russian)

7. Spiridonov E. S., Maksimov A. V. *Nauchnye osnovy optimizatsii organizatsii i upravleniya kompleksom rabot po pereustroystvu transportnykh ob'ektov* [Scientific foundations for optimizing the organization and management of a complex of works on the reconstruction of transport facilities]. Moscow: Izvestiya Publ., 1998, 290 p. (In Russian)

8. Sobolev V. I. *Sovershenstvovanie organizatsionno-tekhnologicheskogo proektirovaniya stroitel'nogo proizvodstva: monografiya* [Improving organizational and technological design of construction production: monograph]. Novocherkassk: Yuzh.-Ros. gos. tekhn. un-t, 2001, pp. 86–96. (In Russian)

9. Panchenko N. M. K voprosu otsenki kachestva funktsionirovaniya tekhnologicheskikh protsessov v stroitel'stve cherez ikh proizvoditel'nost' i sroki vypolneniya rabot [On the issue of assessing the quality of functioning of technological processes in construction through their productivity and deadlines for work performance]. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya: rets. nauch. zhurn.* [Trends in the development of science and education: reviewed scientific journal]. Samara, 2021, Iss. 78, part 2, pp. 90–93. (In Russian)

10. Panchenko N. M. Vybora ratsional'nogo sochetaniya zemleroynoy i transportnoy tekhniki pri proizvodstve zemlyanykh rabot [Selection of a rational combination of earthmoving and transport equipment in earthworks]. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya: rets. nauch. zhurn.* [Trends in the development of science and education: reviewed scientific journal]. Samara, 2022, Iss. 87, part 3, pp. 70–74. (In Russian)

Received: June 06, 2025

Accepted: July 12, 2025

Author's information:

Nataliya M. PANCHENKO — PhD in Engineering, Associate Professor; panchnat@rambler.ru

Dmitriy A. BASOVSKIY — PhD in Engineering, Associate Professor; basovskiy76@mail.ru

УДК 625.12

Лабораторные испытания оттаивающих многолетнемерзлых грунтов земляного полотна для определения статического и динамического модулей деформации

А. В. Святогорова, Д. В. Рубцов, Е. И. Вельгун, Д. Л. Соколов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Святогорова А. В., Рубцов Д. В., Вельгун Е. И., Соколов Д. Л. Лабораторные испытания оттаивающих многолетнемерзлых грунтов земляного полотна для определения статического и динамического модулей деформации // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 3. — С. 176–185. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-176-185

Аннотация

Цель: Изучение оттаивающих многолетнемерзлых грунтов земляного полотна посредством лабораторных испытаний, направленных на определение статического и динамического модулей деформации. Данные исследования необходимы для оценки прочностных характеристик и деформационных свойств грунта, что позволит повысить надежность проектирования и строительства сооружений в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов, обеспечивая безопасность эксплуатации объектов инфраструктуры. **Метод:** Лабораторные испытания проводились с помощью прибора трехосного сжатия НПП «Геотек». **Результаты:** Основными результатами испытаний является получение модуля деформации в условиях статического и динамического нагружения предварительно замороженного образца. **Практическая значимость:** Полученные результаты обладают значительной практической значимостью, поскольку обеспечивают возможность разработки обоснованных технических решений при строительстве и эксплуатации сооружений в регионах с распространением многолетнемерзлых грунтов. Важность таких исследований обусловлена необходимостью учета специфики механического поведения оттаивающего грунта, что непосредственно влияет на прочность и стабильность конструкций.

Ключевые слова: Железные дороги, оттаивающий грунт, земляное полотно, статический модуль деформации, динамический модуль деформации, многолетнемерзлые грунты.

Введение

Многочисленные регионы России характеризуются наличием многолетнемерзлых грунтов, занимающих значительную площадь территории страны. Особенность таких грунтов состоит в наличии льда в структуре, что придает им уникальные свойства, отличающиеся от обычных почвенных образований. При повышении температуры, вызванном климатическими условиями или антропогенным влиянием, начинается процесс оттаивания, приводящий к существенным изменениям физических и механических характеристик грунта [1, 2].

Эти изменения оказывают решающее воздействие на условия эксплуатации сооружений различного назначения, расположенных в указанных регионах. Особенно актуально исследование процесса оттаивания многолетнемерзлых грунтов в связи с интенсивным развитием инфраструктуры и увеличением объемов строительства в Арктике и Субарктике.

Главная задача статьи — изучить закономерности изменений физико-механических свойств грунтов при переходе из мерзлого состояния в талое состояние. Для достижения цели использованы современные методы лабораторных испытаний, позволяющие точно измерять показатели деформаций и напряжения, возникающие в процессе оттаивания.

Важнейшим результатом проведенного эксперимента стало получение значений статического и динамического модулей деформации, необходимых для корректного моделирования нагружений и расчетов конструкций.

Описание лабораторной установки

Испытания проводятся с использованием динамического трехосного стабилометра производства компании «Геотек». Стабилометр выполняет динамическое и статическое трехосное испытание в соответствии со спецификациями Российской Федерации ГОСТ Р 56353—2015 и ГОСТ Р 59597—2021 [3, 4].

Схема лабораторной установки представлена на рис. 1.

Прибор трехосного сжатия (или триаксиальная установка) используется в геотехнических лабораториях для изучения механических свойств грунтов и горных пород под действием различных видов напряжений. Этот аппарат применяется главным образом для измерения прочности и деформации образцов грунта при всестороннем (трехосном) приложении сжимающего усилия.

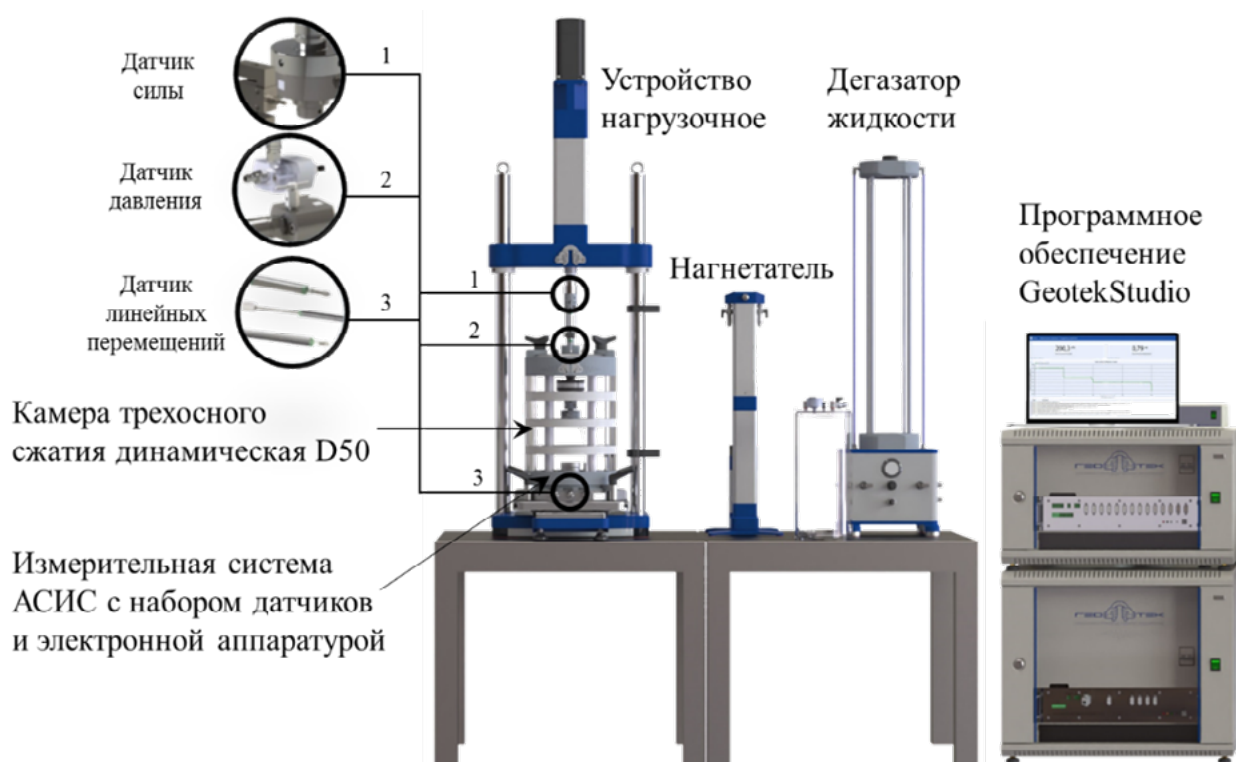


Рис. 1. Схема лабораторной установки

Основные элементы прибора трехосного сжатия:

1. Камера высокого давления: герметичная камера, в которой размещается образец грунта. Камера наполняется жидкостью под давлением, создающим боковую нагрузку на образец.

2. Нагрузочное устройство: механизм подачи вертикальной осевой нагрузки на верхний торец образца, позволяющий создавать различные уровни нормального напряжения.

3. Система управления нагрузкой: включает устройства регулирования и поддержания заданных уровней боковых и осевых усилий.

4. Регистрирующая система: датчики и оборудование для регистрации величин деформации, приложенного давления и иных параметров.

Подготовка образца грунта для испытаний

Перед началом испытаний с помощью разъемного кольца из грунта нарушенной структуры изготавливается образец грунта размером 50 мм на 100 мм цилиндрической формы.

Затем, для создания условий оттаивания, грунт помещается в морозильную камеру минимум на 12 часов.

В этом исследовании для расчета деформаций использовался плотный супесчаный грунт плотностью $\rho = 1,91 \text{ г/см}^3$. Характеристики грунта приведены в таблице.

Параметры грунта для испытаний

Температура, $t, ^\circ\text{C}$	Влажность, $w, \%$	Главное напряжение, σ_3 , кПа	Главное напряжение, σ_1 , кПа	Частота нагружения f , Гц
-1	9,2	10	10	1,0
-1	10	15	50	2,0
-0,5	12	20	100	3,0
-0,5	14,3	30	200	4,0

Фото изготовленных образцов представлено на рис. 2.

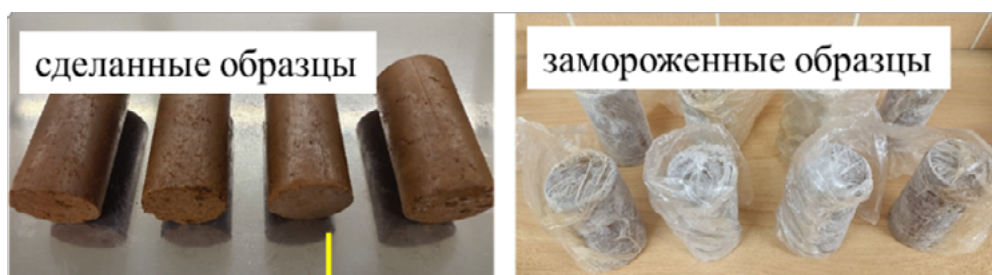


Рис. 2. Изготовленные образцы для лабораторных испытаний
(фото: А. В. Святогорова)



Рис. 3. Изготовленный лед для лабораторных испытаний (фото: А. В. Святогорова)

Во время проведения испытаний очень важно поддерживать конкретную температуру грунта, обозначенную в схеме испытаний.

Для этого также за некоторое время до испытаний изготавливаются образцы из дистиллированной воды, которые затем также будут установлены в камеру (рис. 3).

Этапы проведения испытаний

Все испытания проводятся в соответствии с ГОСТ Р 59597—2021 [4], ГОСТ 12248—2010 [5], ГОСТ Р 56353—2015 [3]. В соответствии с методическими рекомендациями к испытаниям в камере трехосного сжатия НПП «Геотек» [6] последовательность действий при проведении испытаний следующая:

1. Изготавливаются образцы грунта и лед.
2. Проводится подготовка лабораторного оборудования перед началом испытания (проверка наличия всех необходимых инструментов, наличия датчиков).
3. Непосредственно перед установкой испытуемого образца заливается вода в дегазатор.
4. Устанавливается образец грунта в специальную мембрану и на плунжер с обложением фильтрованной бумагой (рис. 4).
5. Укладываются образцы льда в камеру.
6. Происходит закрытие трехосной камеры, установка и закрепление колбы (рис. 5).
7. Вода из дегазатора подается с помощью нагнетателя в камеру.
8. Устанавливаются датчики перемещений.
9. Вводятся в приложении GeotekStudio необходимые параметры испытания, тип испытаний и требуемые ограничения. После ввода нужных параметров необходимо нажать кнопку «Начать испытание».
10. Испытание завершается по достижении установленного количества циклов нагрузки. После испытания нагрузочное устройство автоматически

разгружается, давление в трехосной камере сбрасывается, и рабочая жидкость сливается.

11. По окончании испытаний данные экспортируются автоматически в измерительную систему АСИС «Обозреватель протоколов» (рис. 6).

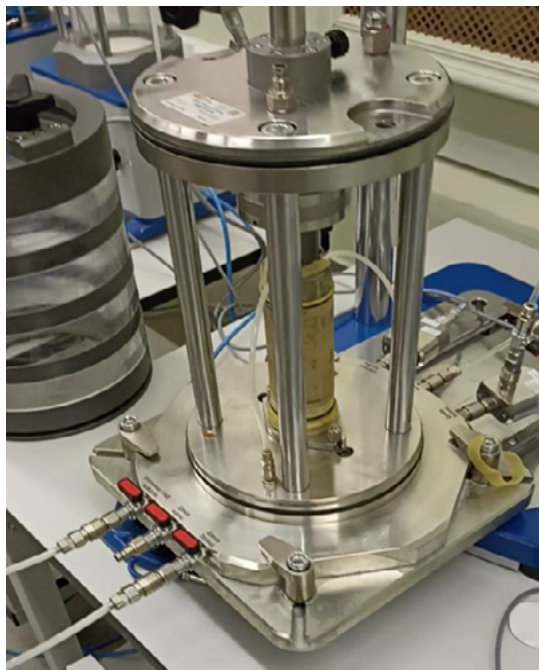


Рис. 4. Установленный образец в камеру трехосного сжатия (фото: А. В. Святогорова)

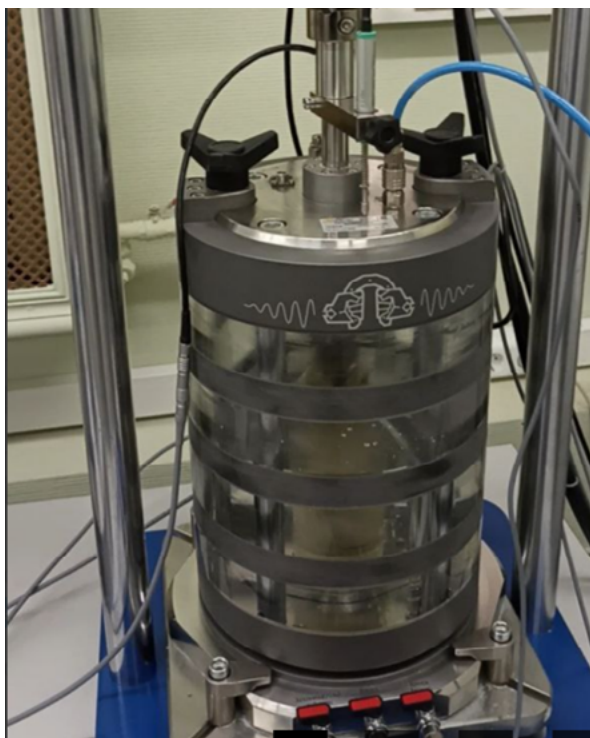


Рис. 5. Установленный образец (фото: А. В. Святогорова)

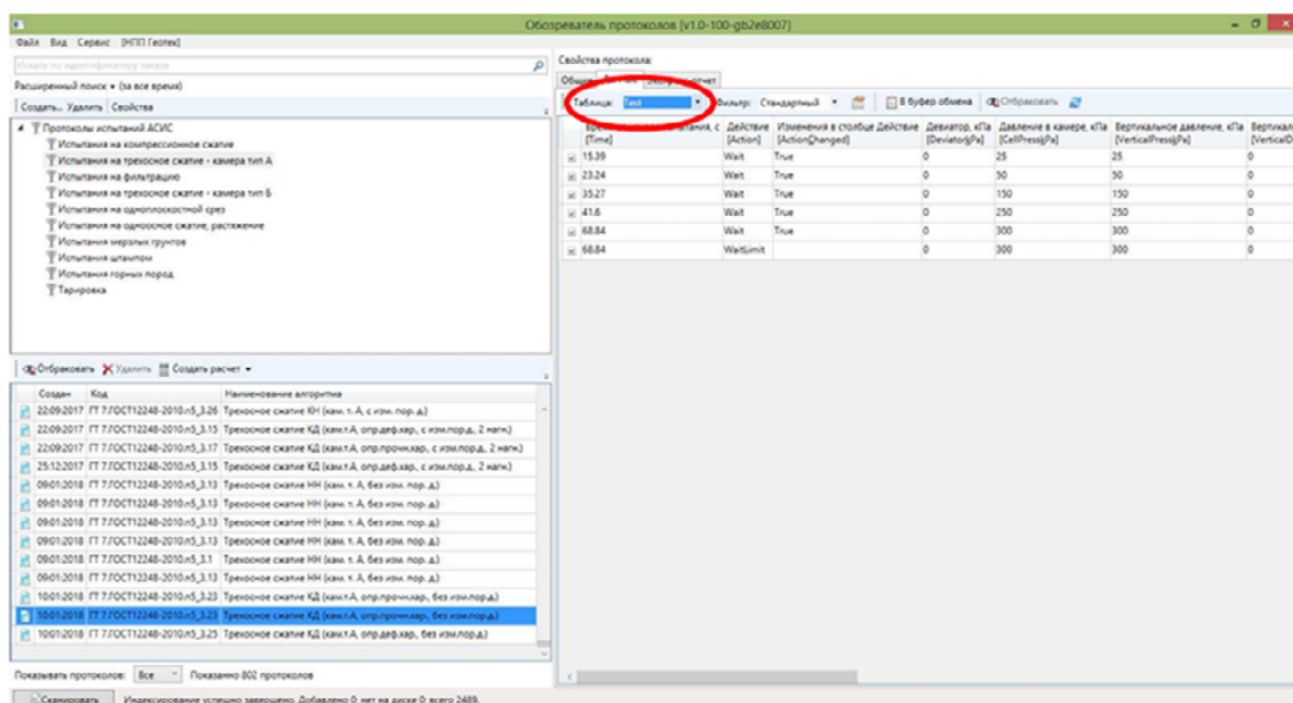


Рис. 6. Рабочее окно системы АСИС «Обозреватель протоколов»

В зависимости от задаваемых параметров одно испытание проходит около часа. Во время статических испытаний нагрузочное устройство все время воздействует на образец, при этом постепенно увеличивая нагрузку. В случае с динамикой нагрузочное устройство последовательно задает определенную нагрузку, резко сбрасывает ее, затем устанавливает еще большую нагрузку, и так продолжается до момента разрушения образца.

После проведения испытания приступают к их обработке.

Обработка результатов испытаний

Для обработки результатов после завершения испытания была использована программа «Обозреватель протоколов» НПП «Геотек».

Результаты испытаний в Обозревателе протоколов отображаются в табличной форме, данные можно скопировать и переносить в удобные пользователю сервисы для обработки информации.

На основе результатов испытаний были построены графики зависимости осевого напряжения (кПа) от осевой деформации, примеры результатов динамических и статических испытаний представлены на рис. 7 и 8.

На основании полученных графиков по формулам (1) и (2) можно определить значения статического и динамического модулей деформации [7]:

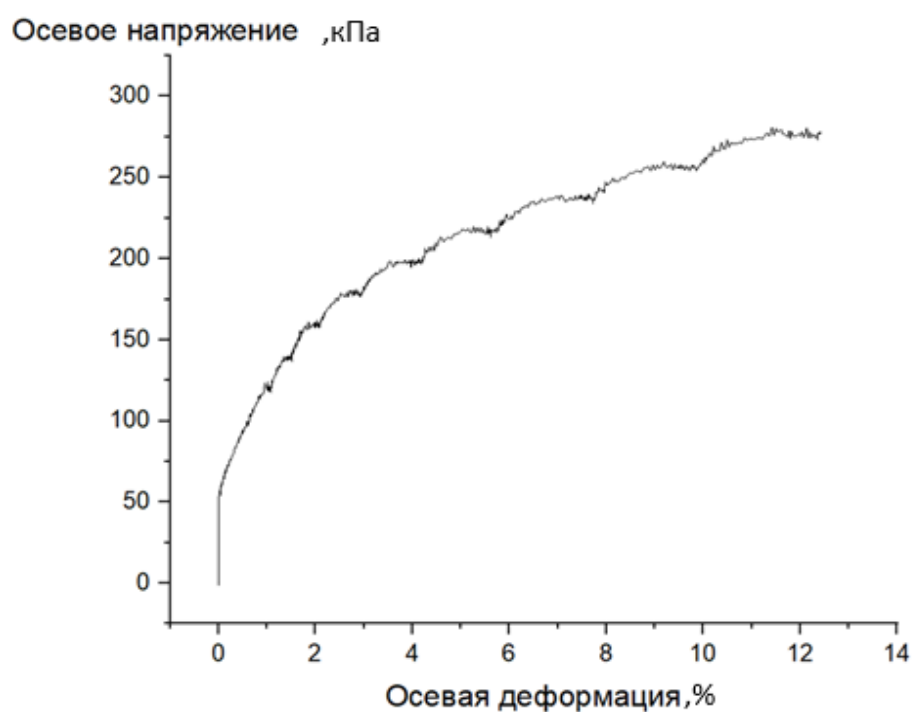


Рис. 7. Определение динамического модуля деформации

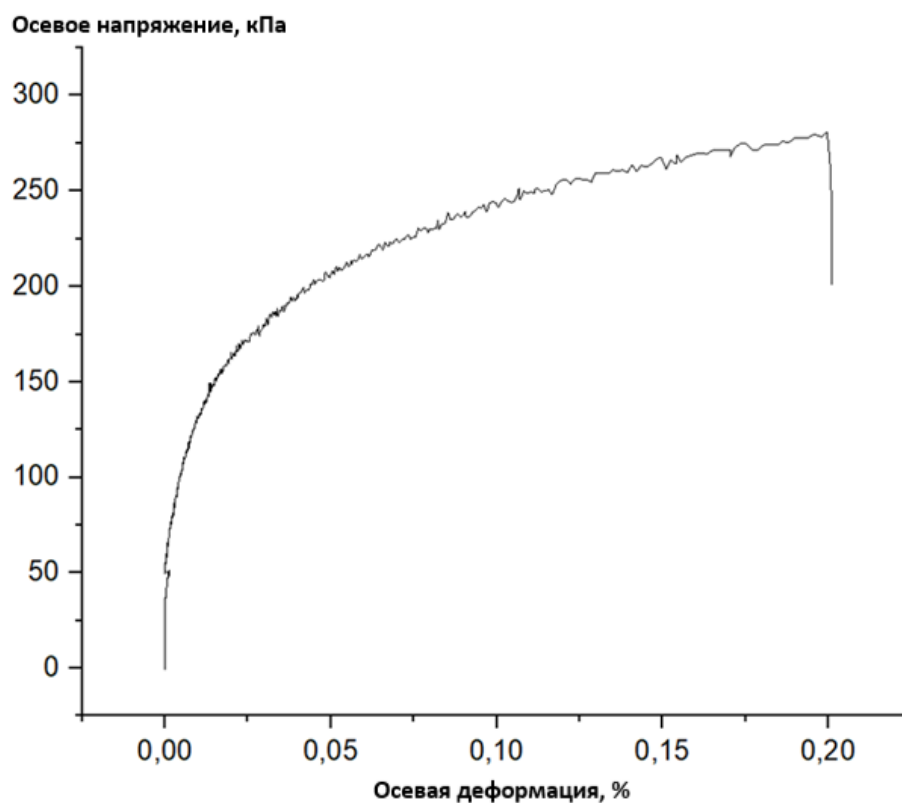


Рис. 8. Определение статического модуля деформации

$$E_{\text{ст}} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon}; \quad (1)$$

$$E_{\text{дин}} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon_{\text{max}}}, \quad (2)$$

где $E_{\text{ст}}$ — статический модуль деформации, кПа;
 $E_{\text{дин}}$ — динамический модуль деформации, кПа;
 σ — главное напряжение, кПа;
 ϵ — значение осевой деформации, %.

По результатам расчета было выявлено, что значение динамического модуля деформации значительно выше, чем статического.

Заключение

Статические и динамические испытания, проведенные в рамках данной статьи, показали высокую эффективность лабораторных испытаний оттаивающих многолетнемерзлых грунтов в камере трехосного сжатия. Определены ключевые характеристики грунта, такие как статические и динамические модули деформации, необходимые для проектирования и анализа поведения земляного полотна в суровых природных условиях.

Выявленные различия между значениями статического и динамического модулей подтверждают необходимость отдельного учета напряженно-деформационного состояния при проектировании сооружений в районах вечноммерзлых пород. Динамический модуль оказался существенно выше статического, что позволяет точнее оценивать поведение конструкций при воздействии вибрационных и ударных нагрузок.

Список источников

1. Юрченко В. А. Вечная мерзлота: геокриологические опасности и региональная деградация мерзлых грунтов / В. А. Юрченко, А. В. Манько // ИВД. — 2023. — № 8(104). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vechnaya-merzlota-geokriologicheskie-opasnosti-i-regionalnaya-degradatsiya-merzlyh-gruntov>.
2. Бушуев Н. С. Особенности проектирования трассы железной дороги в условиях вечной мерзлоты / Н. С. Бушуев, С. В. Шкурников, В. А. Герасимов и др. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2019. — № 3(63). — С. 135–142.
3. ГОСТ Р 56353—2015. Грунты. Методы лабораторного определения динамических свойств дисперсных грунтов.
4. ГОСТ Р 59597—2021. Грунты. Метод трехосного сжатия мерзлых грунтов.

5. ГОСТ 12248—2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.

6. Методические рекомендации по проведению испытаний в камере трехосного сжатия динамической ГТ 2.3.20 и колонке резонансной малой ГТ 2.3.22 НПП «Геотек».

7. Прокудин И. В. Прочность и деформативность железнодорожного земляного полотна из глинистых грунтов, воспринимающих вибродинамическую нагрузку: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.06 / И. В. Прокудин. — Ленинград, 1982. — 458 с.

Дата поступления: 15.06.2025

Решение о публикации: 28.07.2025

Контактная информация:

СВЯТОГОРОВА Анастасия Владимировна — инженер; svyatogorova@pgups.ru

РУБЦОВ Дмитрий Владимирович — студент; rubtsov47@gmail.com

ВЕЛЬГУН Елизавета Игоревна — студент; velgun51@gmail.com

СОКОЛОВ Демид Леонидович — студент; demid.sokolov99@mail.ru

Laboratory Testing of Thawing Permafrost Subgrade Soils to Determine Static and Dynamic Deformation Modulus

A. V. Svyatogorova, D. V. Rubtsov, E. I. Velgun, D. L. Sokolov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Svyatogorova A. V., Rubtsov D. V., Velgun E. I., Sokolov D. L. Laboratory Testing of Thawing Permafrost Subgrade Soils to Determine Static and Dynamic Deformation Modulus. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 3, pp. 176–185. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-176-185

Summary

Purpose: To analyse the thawing of permafrost subgrade soils through laboratory tests aimed at determining the static and dynamic deformation modules. These studies are essential for evaluating the strength characteristics and deformation properties of the soil, thereby enhancing the reliability of design and construction of structures in permafrost conditions, thus ensuring the safety of infrastructure facilities. **Method:** Laboratory tests were carried out using a three-axis compression device developed by “Geotek” Scientific Industrial Enterprise. **Results:** The primary outcomes of the investigation are the acquisition of the deformation modulus of a pre-frozen sample under both static and dynamic loading conditions. **Practical significance:** The results obtained are of crucial practical significance, as they provide the opportunity to develop effective technical solutions for the construction and operation of structures in permafrost regions. The significance of these studies lies in their ability to account for the unique mechanical behaviour of thawing soils, which directly affects the strength and stability of structures.

Keywords: Railways, thawing soils, subgrade, static modulus of deformation, dynamic modulus of deformation, permafrost soils.

References

1. Yurchenko V. A., Manko A. V. *Vechnaya merzlota: geokriologicheskie opasnosti i regional'naya degradatsiya merzlykh gruntov* [Permafrost: geocryological hazards and regional degradation of frozen soils]. IVD, 2023, Iss. 8(104). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vechnaya-merzlota-geokriologicheskie-opasnosti-i-regionalnaya-degradatsiya-merzlyh-gruntov>. (In Russian)
2. Bushuev N. S., Shkurnikov S. V., Gerasimov V. A. et al. Osobennosti proektirovaniya trassy zheleznoi dorogi v usloviyakh vечноi merzloty [Features of railway route design in permafrost conditions]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling]. 2019, Iss. 3(63), pp. 135–142. (In Russian)
3. *GOST R 56353—2015. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya dinamicheskikh svoystv dispersnykh gruntov* [GOST R 56353—2015. Soils. Methods for laboratory determination of dynamic properties of dispersed soils]. (In Russian)
4. *GOST R 59597—2021. Grunty. Metod trekhosnogo szhatiya merzlykh gruntov* [GOST R 59597—2021. Soils. Triaxial compression method for frozen soils]. (In Russian)
5. *GOST 12248—2010. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya kharakteristik prochnosti i deformiruemosti* [GOST 12248—2010. Soils. Methods for laboratory determination of strength and deformability characteristics]. (In Russian)
6. *Metodicheskie rekomendatsii po provedeniyu ispytaniy v kamere trekhosnogo szhatiya dinamicheskoi GT 2.3.20 i kolonke rezonansnoi maloi GT 2.3.22 NPP “Geotek”* [Methodical recommendations for testing in a dynamic triaxial compression chamber GT 2.3.20 and small resonance column GT 2.3.22 of NPP “Geotek”]. (In Russian)
7. Prokudin I. V. *Prochnost' i deformativnost' zheleznodorozhnogo zemlyanogo polotna iz glinistykh gruntov, vosprinimayushchikh vibrodinamicheskuyu nagruzku: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.22.06* [Strength and deformability of railway roadbed made of clay soils subject to vibrodynamic load: dis. ... Doctor of Technical Sciences: 05.22.06]. Leningrad, 1982, 458 p. (In Russian)

Received: June 15, 2025

Accepted: July 28, 2025

Author's information:

Anastasia V. SVYATOGOROVA — Engineer; svyatogorova@pgups.ru

Dmitry V. RUBTSOV — Student; rubtsov47@gmail.com

Elizaveta I. VELGUN — Student; velgun51@gmail.com

Demid L. SOKOLOV — Student; demid.sokolov99@mail.ru

УДК 624.159.2

Кавказская перевальная железная дорога — путь к объединению народов

Д. В. Козин, С. В. Шкурников

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Козин Д. В., Шкурников С. В. Кавказская перевальная железная дорога — путь к объединению народов // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 3. — С. 186–193. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-186-193

Аннотация

Цель: Заключается в анализе влияния природных и климатических условий на процесс строительства и функционирования железных дорог, которые направлены на освоение новых территорий, соединение населенных пунктов и индустриальных центров. Российская Федерация, как и ранее СССР, характеризуется значительным разнообразием природных и климатических зон, создающих существенные препятствия при строительстве транспортных коммуникаций. В данной статье рассматривается влияние особенностей ландшафта и местных условий на создание инженерного объекта, призванного объединить регионы и народы, на примере строительства Кавказской перевальной железной дороги.

Методы: Историко-аналитический метод для изучения архивных материалов и документации по строительству дороги; картографический анализ для оценки рельефа и природных условий региона; сравнительный метод для сопоставления различных участков строительства; системный подход к анализу взаимодействия природных факторов и инженерных решений. **Результаты:** Анализ показал, что основными препятствиями при строительстве стали: сложный горный рельеф с перепадами высот и крутыми склонами; климатические особенности региона: обильные осадки, снежные лавины, оползни; геологические условия: наличие скальных пород, неустойчивых грунтов; природные барьеры: горные реки, ущелья, ледники; недостаточная техническая оснащенность и несовершенство механизмов того времени; а также исторические события, влиявшие на регион, и отсутствие единого мышления в плане нахождения решения проблемы. **Практическая значимость:** Данное исследование демонстрирует, как природные условия могут существенно влиять на реализацию крупных инфраструктурных проектов, и подчеркивает необходимость тщательного изучения местности перед началом строительства.

Ключевые слова: Горы, Кавказская перевальная железная дорога, искусственные сооружения, лавины, противолавинные сооружения.

Введение

Начнем с исторического контекста вопроса строительства дороги через Кавказский хребет. Издавна Кавказ имел доступ к водным путям в Черном и Каспийском морях, через которые открывались выходы в разные уголки мира. Эти направления служили главным образом для культурных и торговых связей.

В центральной части Большого Кавказа природные особенности способствовали созданию первых троп через горы, которыми пользовались люди, населявшие этот регион, а впоследствии и русские войска. Так, уже в XIX в. дорога от Владикавказа до Тифлиса была улучшена и стала называться Военно-Грузинской

(рис. 1). Тогда начали задумываться об обеспечении возможности бесперебойного движения, усложнявшегося метелями и обвалами [1].



Рис. 1. Военно-Грузинская дорога. Кобийский спуск

С этого момента началось развитие путей передвижения на Кавказе (рис. 2):

- 1811 г. — первое предложение о пересечении Кавказского хребта тоннелем;
- 1841 г. — проект новой дороги имел более однообразный профиль, без крутых подъемов, проходящий по дну долины;
- 1870–1890 гг. — для сокращения участков дороги, подверженных обвалам, предлагались варианты со строительством тоннелей и галерей.



Рис. 2. Схема главных грунтовых дорог XIX в.

Проблема Транскавказской железной дороги

Перейдем к железнодорожному транспорту. Проблема Транскавказской железной дороги (далее — ТКЖД) — одна из самых давних и сложных в истории железнодорожного строительства. Вопрос прохождения железной дороги через Кавказский хребет интересовал многих инженеров и не раз обсуждался в высших кругах царской России, которые стремились использовать транспорт как орудие эксплуатации народов, населявших Кавказ.

После войны 1854–1855 гг., когда решающие бои шли под Севастополем, а российские войска столкнулись с полной недостаточностью коммуникаций в этом регионе, необходимость ТКЖД вышла на первое место. Так, в 1857 г. наместник Кавказа направил в Петербург свои соображения о дороге с паровой тягой, предлагая построить в первую очередь участок Поти — Тифлис. Проект предполагал строительство на Сурамском перевале тоннеля длиной 3,49 км [1].



Рис. 3. Сурамский перевал и тоннель

И только в 1865 г. удалось получить разрешение на строительство земляного полотна силами войск и местного населения. Таким образом, дорога до Тифлиса была готова через семь лет, а до Баку — к 1883 г.

В 1869 г. инженер Б. И. Косцеша-Статковский предложил вариант ТКЖД через Крестовый перевал, который с природной и топографической точки зрения хорошо подходил для прокладывания там железной дороги от Владикавказа до ст. Мцхета. Руководящий уклон составлял порядка 55 ‰. Статковский основывался на опыте американских железных дорог. Также на участке предполагались тоннель и каменные ИССО (рис. 4) [1].

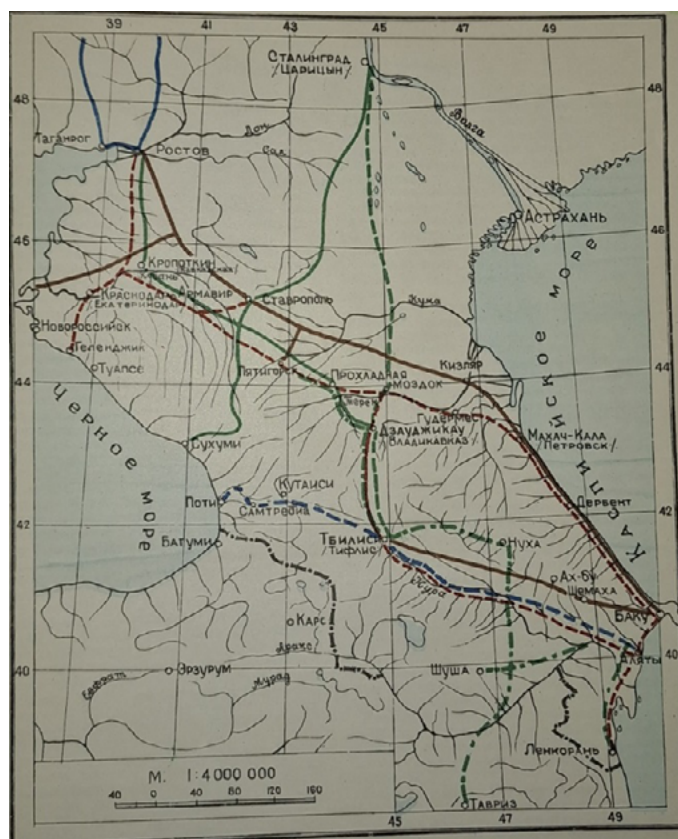


Рис. 4. Направления, предполагавшиеся в 1857–1870 гг.

Предложение было встречено с возражениями, в целом касавшимися руководящего уклона. В итоге проект был переработан под максимальный уклон в 25 ‰ и минимальный радиус кривой 267 м. Однако этот вариант так и не был осуществлен из-за высокой стоимости и длительного срока строительства [1].

К вопросу неоднократно возвращались и проводили изыскания в 1885 г., 1894 г. и 1898 г., но все они так и не приблизили решение проблемы [2].

Стоит отметить, что в 1907 г. военным инженером А. А. Кучинским была предложена идея пересечь Кавказский хребет узкоколейной электрической железной дорогой по Квенамтскому направлению. Уже в 1908 г. были произведены изыскания. Проект существенно отличался от других тем, что предполагалось обойтись без перевального тоннеля, так как он служил лишь средством смягчения уклонов для паровой тяги.

Кучинский также выступал против «низкой» дороги, считая, что опасность от снежных заносов и лавин зависит не от высоты расположения дороги, а от топографических условий. Однако проект встретил множество препятствий и неоднократно перерабатывался.

В период 1921–1946 гг. было разработано множество направлений с разными техническими характеристиками и условиями, но экономические проблемы и начавшаяся в 1941 г. Великая Отечественная война отложили решение вопроса Перевальной железной дороги «на полку» [1, 2].

К обсуждению возвращались и во второй половине 2000-х гг., после переговоров руководства России и Грузии. Президентом Владимиром Путиным давались соответствующие поручения, и Минтранс РФ рассматривал возможность строительства линии. Однако дальше предварительных исследований и на этот раз дело не двинулось [3].

Остановимся на географическом положении, рельефе Кавказа и борьбе с лавинами. Данный регион расположен между Черным и Азовским морями с запада и Каспийским — с востока. Занимает сравнительно небольшую площадь около 500 тыс. кв. км, а по административному делению разбивается на: Дагестан, Чечню, Адыгею, Ингушетию, Краснодарский край, Ставропольский край, Северную и Южную Осетию, Абхазию, Карачаево-Черкесию, Кабардино-Балкарию, а также Армению, Азербайджан и Грузию [1, 4].

Кавказ отличается большим разнообразием географического ландшафта: высочайшие покрытые ледниками горы сменяются долинами и степями. Климат — субтропический и влажный с Черноморской стороны, с вечными снегами в высокогорьях и сухой континентальный в Прикаспийских степях. Все это делит регион на три части: Северный Кавказ, Большой Кавказ и Закавказье (рис. 5).

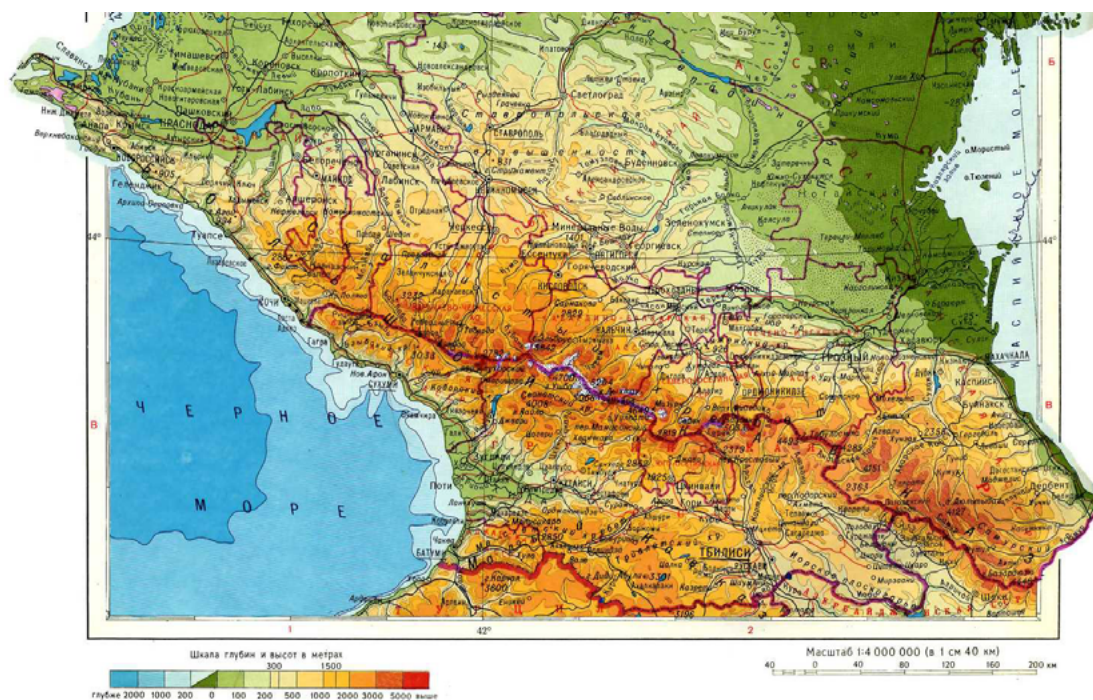


Рис. 5. Физическая карта Кавказа

Большой Кавказ состоит из системы горных цепей и хребтов, достигающих больших высот. Он начинается небольшими холмами на западе, постепенно повышаясь к востоку до отметок 2500–3000 м. Далее за Клухорским перевалом и до Крестового перевала высота гребня повсюду превышает снеговую линию, где и сосредоточены все крупные ледники [1].

Лавины представляют серьезную опасность, с которой приходится считаться в высокогорных районах. При освоении лавиноопасных территорий наибольшие затруднения вызывает проведение путей сообщения и их бесперебойная эксплуатация в зимний период. Из-за этого многие районы Кавказа могут быть отрезаны от внешнего мира на протяжении нескольких месяцев. Помимо перерывов в движении, лавины наносят значительные повреждения земляному полотну и ИССО [1].

Для борьбы с лавинами изначально применялись простейшие средства, такие как частоколы, деревянные щиты и лесонасаждения. Однако эти методы оказались неэффективными. В результате инженеры пришли к выводу о необходимости использования специальных сооружений непосредственно на железной дороге: тоннелей, галерей, пропуска лавин под мостами и других защитных конструкций.

Особого внимания заслуживает опыт Северного склона Военно-Грузинской дороги, где широкое распространение получило устройство лавиноотбойных стенок (рис. 6) [1].



Рис. 6. Пример защитной галереи на БАМе

Заключение

В заключение хотелось бы отметить, что вопрос строительства Кавказской перевальной железной дороги по сей день остается открытым. С ее постройкой открывается путь в несколько приграничных государств: Южную Осетию, Грузию и Армению, а также появляется выход на Ближний Восток. Это повлечет за собой существенное увеличение товарооборота между странами и рост экономики региона в целом.

Список источников

1. Чечулин Л. Г. Кавказская перевальная железная дорога / Л. Г. Чечулин, В. С. Мирголовский. — Л.: Типография ЛенВО, 1947.
2. Транскавказская железная дорога и евразийская интеграция Кавказа. — URL: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=139651>
3. «Одна из крупнейших проблем железнодорожного строительства на Кавказе» — стальная магистраль из России в Грузию. — URL: <https://dzen.ru/a/ZD1jTMbyCmfo-yeJ>.
4. Кавказ. — URL: <https://web.archive.org/web/20240807190510/https://ru.m.wikipedia.org/wiki/Кавказ>.

Дата поступления: 21.06.2025

Решение о публикации: 08.08.2025

Контактная информация:

КОДИН Дмитрий Вадимович — студент; kodin.dmitry2003@yandex.ru

ШКУРНИКОВ Сергей Васильевич — канд. техн. наук, заведующий кафедрой

«Изыскания и проектирование железных дорог»; 3123810@mail.ru

The Caucasian Mountain Railway: a Route to Uniting People

D. V. Kodin, S. V. Shkurnikov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Kodin D. V., Shkurnikov S. V. The Caucasian Mountain Railway: a Route to Uniting People. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 3, pp. 186–193. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-186-193

Summary

Purpose: To analyse the impact of environmental and climatic factors on the construction and operation of the railway. The objective of the project was to facilitate the development of new territories and to establish connections between settlements and industrial centres. The Russian Federation, formerly the USSR, is characterized by a diverse array of geographic and climatic regions, which posed challenges to the construction project. This article will examine how the landscape and terrain conditions prevented the creation of an engineering structure capable of uniting regions and peoples, using the example of the Caucasian Mountain Railway. **Methods:** The research used a historical and analytical method to study archival materials and documentation on the railway construction, cartographic analysis to assess the relief and natural conditions of the region, a comparative method to compare different construction sites, and a systematic approach to analyzing the interaction of natural factors and engineering solutions. **Results:** The analysis has demonstrated that the primary impediments encountered during the construction phase were attributed to the challenging topography, characterized by mountainous terrain with significant variations in altitude and precipitous slopes. Climatic factors, including heavy precipitation, avalanches and landslides, as well as geological conditions, such as unstable soils and rocky terrain, have also been identified as contributing factors. Natural barriers, such as mountain rivers, gorges and glaciers, have been noted as a hindrance to

progress. In addition, the analysis has highlighted the absence of adequate technical equipment and the inadequacy of the mechanisms employed during that period. Furthermore, historical events that affected the region have been identified as a contributing factor, as has the absence of a unified approach to problem solving. **Practical significance:** This study demonstrates how geographic conditions can significantly affect the implementation of large infrastructure projects and highlights the need for a thorough study of the area before commencing construction.

Keywords: Mountains, Caucasian pass railway, artificial structures, avalanches.

References

1. Chechulin L. G., Mirgolovskiy V. S. *Kavkazskaya pereval'naya zheleznaya doroga* [Caucasian Pass Railway]. Leningrad: Tipografiya LenVO Publ., 1947.
2. *Transkavkazskaya zheleznaya doroga i evraziyskaya integratsiya Kavkaza* [Transcaucasian Railway and Eurasian Integration of the Caucasus]. Available at: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=139651>.
3. “*Odna iz krupneyshikh problem zheleznodorozhnogo stroitel'stva na Kavkaze*” — *stal'naya magistral' iz Rossii v Gruzii* [“One of the Biggest Problems of Railway Construction in the Caucasus” — the Steel Line from Russia to Georgia]. Available at: <https://dzen.ru/a/ZD1jTMbyCmfo-yeJ>.
4. *Kavkaz* [Caucasus]. Available at: <https://web.archive.org/web/20240807190510/https://ru.m.wikipedia.org/wiki/Kavkaz>.

Received: June 21, 2025

Accepted: August 08, 2025

Author's information:

Dmitriy V. KODIN — Student; kodin.dmitry2003@yandex.ru

Sergey V. SHKURNIKOV — Dr. Sci. in Engineering, Head of the Department of Railway Research and Design; 3123810@mail.ru

УДК 331.1

Профессиональные риски Санкт-Петербургского ИВЦ: экономическая сущность и минимизация их воздействия

Л. М. Чеченова¹, В. С. Марютина²

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

²Санкт-Петербургский информационно-вычислительный центр — структурное подразделение Главного вычислительного центра — филиала ОАО «РЖД», Российская Федерация, 192007, Санкт-Петербург, ул. Боровая, 57

Для цитирования: Чеченова Л. М., Марютина В. С. Профессиональные риски Санкт-Петербургского ИВЦ: экономическая сущность и минимизация их воздействия // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 3. — С. 194–208. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-194-208

Аннотация

Цель: Идентифицировать профессиональные риски Санкт-Петербургского информационно-вычислительного центра (СПб ИВЦ) — структурного подразделения Главного вычислительного центра (ГВЦ) — филиала ОАО «РЖД»; рассмотреть вопрос о необходимости улучшения качества организации труда в при условии четкой структуризации и координации действий для обеспечения эффективной работы, что определено регламентом порядка трудовой деятельности в Санкт-Петербургском ИВЦ, который условно разделен на внешние и внутренние источники. **Методы:** Сравнительный анализ показателей, характеризующих структуру списочной численности, оценка результатов подбора, переподготовки и повышения квалификации персонала, зрелости технологических процессов и нормирования труда. Анализ включает оценку уровня оплаты труда с определением степени соответствия фактического состояния организации труда оптимальному уровню. Эффективность использования трудовых ресурсов оценивается с учетом норм трудового законодательства РФ и нормативных регламентов ОАО «РЖД». Особое внимание уделяется задаче повышения экономической эффективности производства ОАО «РЖД». **Результаты:** Идентифицированы риски системы организации труда СПб ИВЦ с условным делением на виды (кадровый, производственный, финансовый); разработана матрица рисков на основе параметров: вероятности их возникновения и степени влияния на бизнес-процессы с субъективной оценкой рисков в контексте результатов, полученных в ходе исследования; разработаны рекомендации по минимизации рисков. **Практическая значимость:** Полученные результаты имеют прикладной характер, поскольку предлагают и обосновывают ряд мер, направленных на оптимизацию бизнес-процессов для повышения эффективности организации труда, что способствует устойчивому развитию деятельности структурных подразделений ГВЦ Российских железных дорог.

Ключевые слова: Система организации труда, информационно-вычислительный центр, профессиональные риски, идентификация, мероприятия по минимизации.

Введение

Эффективная организация труда является ключевым фактором успеха любого предприятия, независимо от его размера и сферы деятельности. Организация труда — система мер, обеспечивающая трудовую деятельность, с целью повышения производительности и эффективности живого труда, достижения наиболее полного использования средств производства (овеществленного труда) [1, с. 14].

Современные тенденции развития бизнеса требуют от предприятий постоянного совершенствования методов управления трудовыми ресурсами. По данным Росстата, уровень безработицы в России по итогам 2024 г. — на уровне 2,4 % [2], что соответствует историческому минимуму за весь период наблюдений с 1991 г. На рынке труда обостряется конкуренция, особенно в IT-сфере. В современных реалиях формирование положительного имиджа компании как социально ответственного работодателя становится важнейшей задачей. Система организации труда в ОАО «РЖД» является сложной и многоуровневой. В условиях постоянно меняющейся экономической ситуации система организации труда сталкивается с различными рисками, которые могут влиять на ее эффективность и привести к серьезным последствиям.

Материалы и методы исследования

Цель настоящего исследования — идентификация рисков в системе организации труда и формирование комплекса мер по повышению ее эффективности. Предмет исследования — прикладные аспекты организации труда в подразделениях ОАО «РЖД», порядок оценки уровня организации труда. Объект исследования — Санкт-Петербургский информационно-вычислительный центр (СПб ИВЦ) — крупнейший центр обработки данных. Он оказывает IT-услуги холдингу «РЖД», дочерним и зависимым обществам, а также иным компаниям — потребителям информационных услуг. СПб ИВЦ занимает на сети одно из ведущих мест по апробации новинок цифровой трансформации, например технологии распределенного реестра данных, смарт-контрактов и системных роботов. Кроме того, СПб ИВЦ реализуются проекты в рамках цифровой трансформации, в том числе разработка чат-ботов для основных производственных процессов подразделений дороги [3].

В прочие задачи СПб ИВЦ входят:

Стратегическое развитие:

- формирование и реализация стратегии развития автоматизированных систем управления холдинга «РЖД»;
- разработка программы информатизации с учетом развития автоматизированных систем управления холдинга и государственных целевых программ в области информатизации.

Интеграция информационных систем:

- обеспечение интеграции создаваемых информационных систем с национальными и международными системами информационного обмена, включая:
 - а) эксплуатацию, сопровождение и внедрение программно-технических комплексов;
 - б) техническое обслуживание оборудования сети передачи данных и локальных вычислительных сетей;

- в) управление информационно-вычислительными ресурсами;
- г) технологическое сопровождение, администрирование и развитие автоматизированных систем управления, прикладных систем и баз данных.

Внешние услуги:

- предоставление услуг внешним заказчикам на договорной основе, включая:
 - а) хостинг;
 - б) размещение серверного и коммуникационного оборудования на специализированной инфраструктуре;
 - в) предоставление информации о пассажирских перевозках;
 - г) подключение к почтовой и информационным системам РЖД [4].

Организация труда в СПб ИВЦ требует четкой структуры и координации действий для обеспечения эффективной работы. Это определено регламентом порядка трудовой деятельности в СПб ИВЦ, который условно разделен на:

внешние источники:

- ГК РФ;
- ТК РФ;

внутренние источники:

- трудовой договор;
- должностная инструкция;
- положение о СПб ИВЦ;
- коллективный договор;
- перечень информации, составляющей коммерческую тайну ОАО «РЖД»;
- инструкция о порядке обращения с информацией, составляющей коммерческую тайну в холдинге РЖД;
- кодекс деловой этики;
- положение о негосударственном пенсионном обеспечении работников холдинга;
- положение о корпоративной аттестации руководителей и специалистов;
- положение об обработке и защите персональных данных работников;
- правила внутреннего трудового распорядка (далее — ПВТР).

Результаты исследования

1. Дана оценка основным элементам организации труда [5, 6] за период 2021–2023 гг.

Подбор, подготовка, переподготовка и повышение квалификации кадров. СПб ИВЦ рассматривает персонал в качестве своего важнейшего актива. Учитывая масштаб деятельности и статус ОАО «РЖД» как крупнейшего работодателя страны, ключевым приоритетом является реализация политики социальной ответственности перед работниками, обществом и государством.

К используемым СПб ИВЦ источникам подбора персонала относятся:

- 1) центр занятости населения — 12 %;

2) рекомендации уже работающих сотрудников — 20 %;

3) отдел подбора персонала социально-кадрового центра Октябрьской железной дороги — 68 %, который размещает объявления и рассматривает кандидатов, отвечающих определенным требованиям (уровень профессионального образования, стаж, знания и навыки), направляя резюме в СПб ИВЦ.

В СПб ИВЦ также действует программа адаптации работников, состоящая из первичной адаптации и адаптации в должности, с целью быстрого приобретения профессиональных знаний и вовлечения в корпоративную культуру [7]. Динамика структуры списочной численности персонала по категориям работников представлена в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Структура списочной численности персонала СПб ИВЦ по категориям работников за 2021–2023 гг.

Категории персонала	Структура, %			Темп роста, %		
	2021	2022	2023	2022/2021	2023/2022	2023/2021
Руководители	11	10	10	88	102	90
Ведущие специалисты	34	36	39	108	103	112
Прочие специалисты	52	51	48	98	92	90
Рабочие	3	3	3	100	100	100

Источник: данные [8].

Приведенные за 2021–2023 гг. данные о занимаемых должностях в СПб ИВЦ показывают рост доли ведущих специалистов, что обосновано потребностью холдинга в высококвалифицированных кадрах, в частности в IT-сфере [8], где технологии развиваются стремительно, половозрастная структура сотрудников может оказывать значительное влияние на работу компании (табл. 2).

Наибольшую долю составляют сотрудники старше 50 лет, наименьшую — в возрасте 31–35 лет, что обосновывает необходимость воспроизводства персонала. Согласно рейтингу специальной оценки условий труда СОУТ, условия труда ОАО «РЖД» определены как оптимальные (1-й класс) [9].

Структура сотрудников по стажу работы позволит определить период работы сотрудников в СПб ИВЦ. Стаж оказывает значительное влияние на профессиональные качества работников (табл. 3).

По результатам анализа можно предположить, что работники со стажем более 10 лет лояльны к условиям работы в компании, для них созданы действенные программы долгосрочного стимулирования. Часть сотрудников со стажем 3–10 лет, получив необходимый опыт, часто увольняется по нескольким причинам: недостаток мотивации, более выгодные условия и высокая оплата труда в других местах. Сотрудники со стажем до 3 лет нередко сталкиваются с трудностями адаптации. Динамика показателей стабильности кадрового состава представлена в табл. 4.

ТАБЛИЦА 2. Структура численности персонала СПб ИВЦ в контексте зависимости от половозрастного признака за 2021–2023 гг.

Год	Пол	Возрастной состав, лет				
		до 30	31–35	36–45	46–50	старше 50
2021 г.	ВСЕГО, уд. вес, %	20	12	23	14	31
	Мужчины, уд. вес, %	28	11	24	11	26
	Женщины, уд. вес, %	16	13	23	15	33
2022 г.	ВСЕГО, уд. вес, %	22	11	23	12	31
	Мужчины, уд. вес, %	34	10	23	9	23
	Женщины, уд. вес, %	16	12	22	14	35
Темп роста 2022/2021, %	ВСЕГО	113	93	97	89	103
	Мужчины	133	94	105	94	100
	Женщины	96	93	93	88	104
2023 г.	ВСЕГО, уд. вес, %	21	10	24	13	32
	Мужчины, уд. вес, %	35	10	21	11	22
	Женщины, уд. вес, %	14	9	26	14	37
Темп роста 2023/2022, %	ВСЕГО	93	82	104	102	99
	Мужчины	102	106	90	120	92
	Женщины	84	72	111	95	102
Темп роста 2023/2021, %	ВСЕГО	105	76	101	91	102
	Мужчины	135	100	95	113	92
	Женщины	81	67	104	84	106

Источник: данные [8].

ТАБЛИЦА 3. Структура сотрудников по стажу работы за 2021–2023 гг.

Год/стаж	до 3 лет	3–10 лет	более 10 лет
2021, уд. вес, %	34	47	18
2022, уд. вес, %	34	42	24
Темп роста 2022 к 2021 году, %	100	89	131
2023, уд. вес, %	34	41	25
Темп роста 2023 к 2022 году, %	96	96	101
Темп роста 2023 к 2021 году, %	96	85	132

Источник: данные [8].

ТАБЛИЦА 4. Коэффициенты, характеризующие стабильность состава работников

Наименование коэффициента	Расчетные результаты по годам		
	2021	2022	2023
Выбытие кадров	0,18	0,15	0,22
Прием кадров	0,09	0,16	0,19
Текучесть кадров	0,08	0,07	0,06
Стабильность кадров	0,92	0,93	0,94

Источник: расчет авторов.

Рост коэффициента стабильности кадров вследствие уменьшения коэффициента текучести может означать позитивный эффект от проведенной работы руководства по сохранению контингента. Коэффициенты выбытия и приема демонстрируют рост, поскольку показатель текучести кадров не учитывает количество работников, уволенных по следующим причинам: окончание периода производственной практики, сокращение штатов (в рамках программы оптимизации предприятия), выход на пенсию, внутрихолдинговое перемещение и другие основания. Можно утверждать, что имеет место увеличение численности уволенных по внутритранспортному переводу (табл. 5). Данная ситуация имеет негативный эффект для СПб ИВЦ, поскольку, в отличие от холдинга «РЖД», рынок предлагает более привлекательные условия труда.

ТАБЛИЦА 5. Удельный вес выбывших из ОАО «РЖД» и в рамках внутритранспортного перевода сотрудников за 2021–2023 гг.

Наименование показателя	2021 г.	2022 г.	2023 г.
Уволено из ОАО «РЖД», %	95,2	87,0	84,2
Перемещение в рамках ОАО «РЖД», %	4,8	13,0	15,8

Источник: данные [8].

Рейтинговые показатели филиала, касающиеся результатов подбора персонала, его переподготовки и повышения квалификации, представлены в табл. 6.

ТАБЛИЦА 6. Показатели предприятия по подбору персонала, его переподготовке и повышению квалификации

Наименование показателя	2021 г.	2022 г.	2023 г.
Укомплектованность кадрами, %	93,1	97,9	98,5
Численность стажеров, имеющих наставника, чел.	6	16	6
Доля работников с несоответствующим уровнем образования на инженерных и технических должностях, чел.	7,4	7,7	6,4

Источник: данные [8, 10, 11].

Положительным эффектом является рост процента укомплектованности штата и снижение доли работников с несоответствующим уровнем образования на инженерных и технических должностях. Однако сокращается численность стажеров, имеющих наставника, что в соотношении с данными табл. 3 позволяет делать вывод о несовершенстве реализации корпоративной программы адаптации. Анализ уровня зрелости технологических процессов и состояния нормирования труда представлен в табл. 7.

ТАБЛИЦА 7. Показатели предприятия, касающиеся зрелости технологических процессов и нормирования труда

Наименование показателя	2021 г.	2022 г.	2023 г.
Доля численности работников ведущих профессий, %	60 %	57 %	63 %
Темп роста производительности труда, %	121,7	103,8	105,5
Темп роста объема работ, %	108,4	104,1	112,8
Себестоимость производства, млн руб.	1,2	1,3	1,4

Источник: данные [10, 12].

Рост численности работников ведущих профессий (отношение списочной численности программистов, электронщиков и технологов к нормативной) свидетельствует о совершенствовании организации и нормирования труда. Это касается специалистов, обеспечивающих технологическое сопровождение информационных систем и поддержку их пользователей. Изменения вносятся постоянно в Методику определения трудозатрат на ИТ-услуги, в частности в часть, касающуюся расчета численности специалистов технической поддержки. В новой редакции учтены трудозатраты на работу с программными роботами, включая их разработку, внедрение, модификацию и сопровождение.

В нормативах трудоемкости учтены следующие затраты рабочего времени:

– оперативное время выполнения работы (без учета времени ожидания выполнения операций). При этом считается, что во время ожидания работник занят другими задачами без потерь рабочего времени;

– время на подготовительно-заключительные действия ($T_{пз}$), обслуживание рабочего места ($T_{об}$), отдых и личные надобности ($T_{отл}$). Эти показатели приняты в процентах к оперативному времени.

Для разных видов работ установлены следующие нормативы:

– для обеспечения функционирования оборудования центрально-вычислительного комплекса, сетей передачи данных, средств вычислительной техники и систем жизнеобеспечения — 9,6 % ($T_{об}$ — 1 %, $T_{пз}$ — 4,5 %, $T_{отл}$ — 4,1 %);

– для обеспечения информационной безопасности оборудования и систем, функционирования программно-технического комплекса, администрирования информационных систем, информационного обслуживания и оказания услуг по обучению — 9,5 % ($T_{об}$ — 0,6 %, $T_{пз}$ — 3,2 %, $T_{отл}$ — 5,7 %) [13].

К положительным эффектам можно отнести рост технических единиц (объем работ предприятия), что повлияло на увеличение объемов производительности труда.

Оплата и материальное стимулирование труда. Затраты на оплату труда растут для повышения материальной заинтересованности работников и удержания квалифицированного персонала в ключевых направлениях: инженерном блоке, блоке информационной безопасности ИТ-ресурсов и производственно-технологическом блоке. Это необходимо также для обеспечения конкурентоспособного уровня заработной платы.

Материальное стимулирование — приоритетный метод поощрения персонала. Оно включает:

- выплаты компенсационного и стимулирующего характера;
- премии из всех источников;
- поощрения;
- оплату по среднему заработку;
- материальную помощь к отпуску;
- прочие выплаты [6, 14].

Оценивая динамику размеров материальной мотивации (рис. 1), можно увидеть, что наибольший рост наблюдается в следующих компонентах:

- выплаты по Коллективному договору ОАО «РЖД»;
- выплаты стимулирующего характера;
- премии из всех источников.

Это произошло по причине увеличения процента дифференцированных региональных надбавок специалистам, а также премиального фонда специалистам и руководителям ряда отделов и должностей.



Рис 1. Темпы роста размеров материальной мотивации сотрудников СПб ИВЦ за 2022–2023 гг., %. *Источник:* данные [15]

Результаты применения различных составляющих материальной мотивации, помимо индексации окладов, положительно сказываются на динамике заработной платы сотрудников, что представлено в табл. 8.

ТАБЛИЦА 8. Темп роста заработной платы и рентабельность мотивации персонала за 2021–2023 гг.

Наименование показателя	2021 г.	2022 г.	2023 г.
Темп роста заработной платы, %	107,7	123,1	134,3
Рентабельность персонала, д. ед.	1,13	0,99	0,94
Рентабельность мотивации персонала, д. ед.	0,94	0,82	0,78
Процент суммарной индексации заработной платы в ОАО «РЖД», %	5,2	14,2	7,75

Показатели рентабельности и мотивации персонала (отражающие динамику стоимости производственного процесса и средств стимулирования) [5] демонстрируют тенденцию к снижению за рассматриваемый период, несмотря на опережающий рост реальной заработной платы (табл. 8) по сравнению с производительностью труда (табл. 7).

2. Идентифицированы риски в системе организации труда Санкт-Петербургского информационно-вычислительного центра с условной их группировкой по видам:

1. Вероятность возникновения кадрового риска, связанного с несоответствующим потребностям распределением и/или недостатком кадровых ресурсов, определяется:

- отсутствием у наиболее ценных работников мотивации к отказу от предложений о смене работодателя (риск связан с удержанием ключевых специалистов). В результате — снижение конкурентоспособности предприятия вследствие потери ценных сотрудников, в том числе в рамках внутритранспортного перевода (табл. 2–5);

- наличием проблем с эффективностью программы адаптации сотрудников или недостаточной поддержкой работников в период адаптации (табл. 3), например снижение количества стажеров, у которых был наставник (табл. 6). Новые сотрудники часто обладают недостаточной квалификацией, что может вызвать недовольство и снижение мотивации у опытных коллег, которым приходится брать на себя дополнительную нагрузку. Это также приводит к низкому уровню удовлетворенности работой как у менее квалифицированных сотрудников, так и у тех, кто вынужден компенсировать их недостатки, что образует дополнительные расходы;

- дисбалансом возрастного состава, который может привести к проблемам в коммуникации между сотрудниками (табл. 2, 3) — риск, связанный с управлением человеческими ресурсами и взаимодействием внутри коллектива. Возможный эффект — снижение эффективности работы в результате «конфликта поколений».

2. Вероятность возникновения производственного риска (оказывает влияние на эффективность и устойчивость производственных процессов) определяется отсутствием оптимума в соотношении нормативной и списочной численности (нормативная численность превышает списочную) (табл. 7), что приводит к следующим последствиям:

- снижение качества оказываемых услуг из-за перегрузки существующего персонала;

- задержки и невыполнение плана по объемам работ из-за недостатка сотрудников;

- отток работников (табл. 4, 5) вследствие нерациональных условий труда;

- дополнительные расходы на внеплановые закупки или аутсорсинг.

3. Вероятность возникновения финансового риска (оказывает влияние на финансовое положение предприятия) определяется:

– снижением рентабельности персонала (в том числе рентабельности мотивации), ростом себестоимости производства (табл. 8), как следствие — ростом стоимости услуг, что влияет на конкурентоспособность оказываемых услуг;

– дисбалансом между темпом роста производительности труда и заработной платы (см. данные за 2023–2024 гг.), что сказывается на увеличении себестоимости производства (табл. 7, 8) — хотя этот риск непосредственно влияет на производство, он имеет и финансовый аспект. Это может привести к снижению прибыли компании, что в перспективе ограничивает возможности для реинвестирования и развития.

3. Построена матрица рисков на основе двух параметров: вероятности их возникновения и степени влияния на бизнес-процессы с субъективной оценкой рисков в контексте результатов, полученных в ходе исследования. На рис. 2 представлены виды рисков (1 — кадровый, 2 — производственный, 3 — финансовый) в соответствии с порядковыми номерами, указанными ранее по тексту.

		<u>Вероятность возникновения</u>			
		высокая	умеренная	низкая	
<u>Степень воздействия</u>	существенная	1.2	1.1		Критический
	умеренная	2.1	3.1		Крупный
	незначительная	3.2	1.3		Средний
					Малый
					Незначительный

Рис. 2. Матрица рисков. Составлено авторами

На основании полученных результатов разработаны меры, принятие которых позволит минимизировать производственные, финансовые и кадровые риски, а также улучшить общую эффективность и качество работы СПб ИВЦ и организации в целом.

4. Разработаны рекомендации по минимизации рисков.

1. Меры минимизации кадрового риска (элементы матрицы размещены в ячейках, оценивающих риск как критический/крупный/малый):

– рассмотреть возможность внедрения нетрадиционных форм занятости при условии, что это не нарушит ритмичность производственного процесса [6];

– расширить программы наставничества для передачи знаний и опыта менее квалифицированным членам команды;

– концентрировать внимание при наборе сотрудников на уровень квалификации и опыт (напр., разработка и внедрение тест-системы отбора кандидатов на работу на определенную должность);

- проводить регулярно оценку квалификации сотрудников и выявлять области, требующие улучшения, на основании результатов разрабатывать индивидуальные планы обучения;

- получать обратную связь от сотрудников для выявления проблем и недостатков в организации труда.

2. Мера минимизации производственного риска (элемент матрицы размещен в ячейке, оценивающей риск как крупный) состоит в том, чтобы продолжать работу в части расчета трудозатрат на услуги в области информационных технологий, тем самым стремиться к приведению нормативной численности к штатной и, соответственно, к списочной.

3. Меры минимизации финансового риска (элементы матрицы размещены в ячейках, оценивающих риск как средний):

- разработать более прозрачные критерии мотивации труда (например, показатели премирования), которые обеспечивают синергию роста заработной платы с ростом производительности труда, производя выплаты в зависимости от достигнутых результатов;

- внедрить системы мониторинга ключевых показателей эффективности (KPI), которые позволяют отслеживать темпы роста производительности труда и заработной платы, вовремя реагируя на дисбаланс значений.

Заключение

Результаты настоящего исследования имеют практическую значимость, поскольку дают наглядное представление по вопросам повышения эффективности организации труда и оптимизации бизнес-процессов, что способствует устойчивому развитию деятельности Российских железных дорог.

Список источников

1. Гершанок А. А. Основы организации труда: учебное пособие / А. А. Гершанок. — Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2019. — 227 с.

2. Трудовые ресурсы, занятость и безработица / Федеральная служба государственной статистики. — URL: https://rosstat.gov.ru/labour_force (дата обращения: 13.07.2025).

3. Электронный мозг дороги // Газета «Октябрьская магистраль». — URL: <https://www.gudok.ru/zdr/169/?ID=1605855> (дата обращения: 13.07.2025).

4. Структура Санкт-Петербургского информационно-вычислительного центра // Официальный сайт ОАО «РЖД». — URL: <https://company.rzd.ru/ru/9349/page/105554?id=2227#enttab-main> (дата обращения: 13.07.2025).

5. Об утверждении Методических рекомендаций по оценке эффективности использования трудовых ресурсов в подразделениях ОАО «РЖД»: распоряжение ОАО «РЖД» от 02.02.2024 № 273/р.
6. Правила внутреннего трудового распорядка Санкт-Петербургского информационно-вычислительного центра № СПбИВЦ-517 от 30.06.2023.
7. Об утверждении Положения об адаптации и наставничестве работников в Главном вычислительном центре — филиале ОАО «РЖД»: распоряжение ГВЦ ОАО «РЖД» от 03.03.2016 № ГВЦ-92/р.
8. Отчет о движении работников и состоянии трудовой дисциплины (форма 1-К (ДР)) Санкт-Петербургского информационно-вычислительного центра за 2021–2023 годы.
9. О специальной оценке условий труда: Федеральный закон от 28.12.2013 № 426-ФЗ (ред. от 24.07.2023).
10. Автоматизированная система мониторинга результатов работы подразделений производственного блока ОАО «РЖД» на основе системы ключевых показателей (АСО КПЭ): данные Санкт-Петербургского информационно-вычислительного центра за 2021–2023 годы (нарастающий итог).
11. Рабочее место руководителя по вопросам управления персоналом, панель «Обучение и развитие»: данные Санкт-Петербургского информационно-вычислительного центра за 2021–2023 годы.
12. ЕК АСУТР «Справка о списочной численности по должностям и профессиям»: данные Санкт-Петербургского информационно-вычислительного центра за 2021–2023 годы.
13. О методике определения трудозатрат на услуги в области информационных технологий: распоряжение ОАО «РЖД» от 10.01.2024 № 14/р.
14. Коллективный договор открытого акционерного общества «Российские железные дороги» на 2023–2025 годы.
15. Подсистема сводной аналитической отчетности по фонду оплаты труда единой корпоративной автоматизированной системы управления трудовыми ресурсами ОАО «РЖД», отчет «Аналитическая ведомость по видам оплат»: данные Санкт-Петербургского информационно-вычислительного центра за 2021–2023 годы.

Дата поступления: 21.07.2025

Решение о публикации: 21.07.2025

Контактная информация:

ЧЕЧЕНОВА Лиана Мухамедовна — д-р экон. наук, доц.; liana1981-149@mail.ru

МАРЮТИНА Влада Станиславовна — магистрант; sta-vlada@mail.ru

Professional Risks Associated with St. Petersburg ICC: their Economic Nature and Ways to Minimize their Impact

L. M. Chechenova¹, V. S. Maryutina²

¹Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²St. Petersburg Information and Computing Center — a structural subdivision of the Main Computing Center — branch of JSC Russian Railways, 57, Borovaya St., Saint Petersburg, 192007, Russian Federation

For citation: Chechenova L. M., Maryutina V. S. Professional Risks Associated with St. Petersburg ICC: their Economic Nature and Ways to Minimize their Impact. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 3, pp. 194–208. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-194-208

Summary

Purpose: To identify the occupational risks at St. Petersburg Information and Computing Center (SPb ICC), a structural unit of the Main Computing Center (MCC) and a “Russian Railways” branch. To investigate the issue of enhancing labour management quality through clear structuring and coordination of actions to ensure effective work, as defined by the labour regulations in St. Petersburg ICC, which are conditionally divided into external and internal sources. **Methods:** A comparative analysis of the indicators characterising the personnel listing; assessment of the results of personnel recruitment, their retraining and upgrading of skills; the maturity of technological processes and labour rationing; the level of labour remuneration, and the compliance of the actual level of labour management with the optimal level in terms of the efficiency of labour resources. This was undertaken in accordance with the Russian labour legislation norms and JSC “Russian Railways” regulations, with the overarching objective being to increase JSC “Russian Railways” economic efficiency. **Results:** The occupational labour risks associated with the management system at St. Petersburg ICC have been identified. The risks have been categorized as follows: personnel, production and financial. A risk matrix has been developed, the parameters of which are as follows: the probability of their occurrence and the degree of impact on business processes, with a subjective assessment of risks in the context of the research results obtained. A set of recommendations for minimizing risks has been formulated. **Practical significance:** The results obtained propose and justify a number of measures aimed at optimizing business processes to improve the efficiency of labour management, which will contribute to the sustainable development of the activities of the MCC structural divisions within Russian Railways.

Keywords: Labour management system, information and computing center, occupational risks, identification, minimization measures.

References

1. Gershanok A. A. *Osnovy organizatsii truda: uchebnoe posobie* [Fundamentals of labor organization: textbook]. Perm': Permskiy gosudarstvennyy natsional'nyy issledovatel'skiy universitet Publ., 2019, 227 p. (In Russian)
2. Trudovye resursy, zanyatost' i bezработitsa [Labor resources, employment and unemployment]. *Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki* [Federal State Statistics Service]. Available at: https://rosstat.gov.ru/labour_force (accessed: July 13, 2025). (In Russian)
3. Elektronnyy mozg dorogi [Electronic brain of the railway]. *Gazeta “Oktyabr'skaya magistr'al' ”*. Available at: <https://www.gudok.ru/zdr/169/?ID=1605855> (accessed: July 13, 2025). (In Russian)

4. Struktura Sankt-Peterburgskogo informatsionno-vychislitel'nogo tsentra [Structure of the St. Petersburg Information and Computing Center]. *Ofitsial'nyy sayt OAO "RZhD"* [Official website of JSC Russian Railways]. Available at: <https://company.rzd.ru/ru/9349/page/105554?id=2227#ent-tab-main> (accessed: July 13, 2025). (In Russian)
5. *Ob utverzhdenii Metodicheskikh rekomendatsiy po otsenke effektivnosti ispol'zovaniya trudovykh resursov v podrazdeleniyakh OAO "RZhD": rasporyazhenie OAO "RZhD" ot 02.02.2024 № 273/r* [On approval of the Methodological recommendations for assessing the efficiency of using labor resources in the divisions of JSC Russian Railways: order of JSC Russian Railways dated 02.02.2024 № 273/r]. (In Russian)
6. *Pravila vnutrennego trudovogo rasporyadka Sankt-Peterburgskogo informatsionno-vychislitel'nogo tsentra № SPbIVTs-517 ot 30.06.2023* [Internal labor regulations of the St. Petersburg Information and Computing Center № SPbIVTs-517 dated June 30, 2023]. (In Russian)
7. *Ob utverzhdenii Polozheniya ob adaptatsii i nastavnichestve rabotnikov v Glavnom vychislitel'nom tsentre — filiale OAO "RZhD": rasporyazhenie GVTs OAO "RZhD" ot 03.03.2016 № GVTs-92/r* [On approval of the Regulation on adaptation and mentoring of employees in the Main Computing Center — branch of JSC Russian Railways: order of the Main Computing Center of JSC Russian Railways dated 03.03.2016 № GVC-92/r]. (In Russian)
8. *Otchet o dvizhenii rabotnikov i sostoyanii trudovoy distsipliny (forma 1-K (DR)) Sankt-Peterburgskogo informatsionno-vychislitel'nogo tsentra za 2021–2023 gody* [Report on employee movement and labor discipline status (form 1-K (DR)) of the St. Petersburg Information and Computing Center for 2021–2023]. (In Russian)
9. *O spetsial'noy otsenke usloviy truda: Federal'nyy zakon ot 28.12.2013 № 426-FZ (red. ot 24.07.2023)* [On special assessment of working conditions: Federal Law of 28.12.2013 № 426-FZ (as amended on 24.07.2023)]. (In Russian)
10. *Avtomatizirovannaya sistema monitoringa rezul'tatov raboty podrazdeleniy proizvodstvennogo bloka OAO "RZhD" na osnove sistemy klyuchevykh pokazateley (ASO KPE): dannye Sankt-Peterburgskogo informatsionno-vychislitel'nogo tsentra za 2021–2023 gody (narastayushchiy itog)* [Automated system for monitoring the performance of divisions of the production block of JSC Russian Railways based on the key performance indicators system (ASO KPI): data from the St. Petersburg Information and Computing Center for 2021–2023 (cumulative total)]. (In Russian)
11. *Rabochee mesto rukovoditelya po voprosam upravleniya personalom, panel' "Obuchenie i razvitie": dannye Sankt-Peterburgskogo informatsionno-vychislitel'nogo tsentra za 2021–2023 gody* [Manager's workplace on personnel management issues, panel "Training and Development": data of the St. Petersburg Information and Computing Center for 2021–2023]. (In Russian)
12. *EK ASUTR "Spravka o spisochnoy chislennosti po dolzhnostyam i professiyam": dannye Sankt-Peterburgskogo informatsionno-vychislitel'nogo tsentra za 2021–2023 gody* [EK ASUTR "List of staff by positions and professions": data of the St. Petersburg Information and Computing Center for 2021–2023]. (In Russian)

13. *O metodike opredeleniya trudozatrat na uslugi v oblasti informatsionnykh tekhnologiy: rasporyazhenie OAO “RZhD” ot 10.01.2024 № 14/r* [On the methodology for determining labor costs for information technology services: order of OAO “RZD” dated 10.01.2024 № 14/r]. (In Russian)

14. *Kollektivnyy dogovor otkrytogo aktsionernogo obshchestva “Rossiyskie zheleznye dorogi” na 2023–2025 gody* [Collective agreement of the open joint-stock company “Russian Railways” for 2023–2025]. (In Russian)

15. *Podsystema svodnoy analiticheskoy otchetnosti po fondu oplaty truda edinoi korporativnoy avtomatizirovannoy sistemy upravleniya trudovymi resursami OAO “RZhD”, otchet “Analiticheskaya vedomost’ po vidam oplat”*: dannye Sankt-Peterburgskogo informatsionno-vychislitel’nogo tsentra za 2021–2023 gody [Subsystem of consolidated analytical reporting on the wage fund of the unified corporate automated labor resource management system of JSC Russian Railways, report “Analytical statement by types of payments”: data from the St. Petersburg Information and Computing Center for 2021–2023]. (In Russian)

Received: July 21, 2025

Accepted: August 31, 2025

Author’s information:

Liana M. CHECHENOVA — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; liana1981-149@mail.ru

Vlada S. MARYUTINA — Master’s Degree Student; sta-vlada@mail.ru