

Главный редактор Д. П. Кононов, д-р техн. наук, доцент
Editor-in-chief D. Kononov, Dr. Sci. in Engineering, 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. Evstaf'ev, Dr. Sci. in Engineering, Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
Научный редактор Т. С. Титова, д-р техн. наук, профессор
Scientific Editor T. Titova, Dr. Sci. in Engineering, Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
Литературное редактирование и корректура Л. А. Солодовникова
Editing and proofreading L. Solodovnikova
Верстка М. В. Цыбульская
Layout M. Tsybul'skaya

Учредитель

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»
Издатель
ООО «Медиа-Сервис» по договору № ЭА87426 от 12.01.2026

Founder

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
Publisher
Media Service LLC № ЭА87426, 12.01.2026

Контакты

190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9,
тел.: +7 (812) 457-85-36, e-mail: brni@pgups.ru;
111024, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Лефортово,
ул. Авиамоторная, д. 50, стр. 2, помещ. 29/2

Contacts

190031, St. Petersburg, Moskovskiy ave., 9,
+7 (812) 457-85-36, e-mail: brni@pgups.ru;
111024, Moscow, inner ter. city municipal district Lefortovo,
Aviamotornaya str., 50 building 2, room 29/2

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

ЭЛ № ФС 77-90893 от 24.02.2026 выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Mass media registration certificate number

ЭЛ No. ФС 77-90893 dd. 24.02.2026 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

Дата выпуска 29.09.2026.

Формат 60x84/16. Уч.-изд. л. 13,72

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

INTERNATIONAL EDITORIAL

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

Хамидов Отабек Рустамович, д-р техн. наук, доцент, Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Республика Узбекистан

Otabek Khamidov, Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor, Tashkent State Technical University, Tashkent, The Republic of Uzbekistan

Ли Вэйли, 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

Fusheng Li, PhD, Professor, Zhengzhou Railway Vocational & Technical College, Zhengzhou, China

Чжан Чжунъян, профессор, Чжэнчжоуский железнодорожный профессионально-технический колледж, Чжэнчжоу, Китай

Zhongyang Zhang, 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, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Vladimir Bel'tyukov, Dr. Sci. in Engineering, 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, Dr. Sci. in Engineering 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, Dr. Sci. in Engineering, Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Грачев Владимир Васильевич, д-р техн. наук, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Vladimir Grachev, Dr. Sci. in Engineering, 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, Dr. Sci. in Engineering, 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, Dr. Sci. in Engineering, 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 Evstaf'ev, Dr. Sci. in Engineering, Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Журавлева Наталья Александровна, д-р экон. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Natal'ya Zhuravleva, Dr. Sci. in Economics, 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, Dr. Sci. in Engineering, Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Колпахчян Павел Григорьевич, д-р техн. наук, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Pavel Kolpakch'yan, Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Липидус Лариса Владимировна, д-р экон. наук, профессор, МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

Larisa Lapidus, Dr. Sci. in Economics, Professor, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Никитин Александр Борисович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Alexander Nikitin, Dr. Sci. in Engineering, Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Никитин Виктор Валерьевич, д-р техн. наук, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Victor Nikitin, Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Пудовиков Олег Евгеньевич, д-р техн. наук, доцент, РВТ, Москва, Россия

Oleg Pudovikov, Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor, Russian University of Transport, Moscow, Russia

Рачек Светлана Витальевна, д-р экон. наук, профессор, УрГУПС, Екатеринбург, Россия

Svetlana Rachev, Dr. Sci. in Economics, Professor, Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg, Russia

Титова Таммила Семеновна, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Tamila Titova, Dr. Sci. in Engineering, 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, Dr. Sci. in Engineering, Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ, ПРЕДЛАГАЕМЫМ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ «БЮЛЛЕТЕНЬ РЕЗУЛЬТАТОВ 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 отсканированном виде.

Файл 4 — информация об авторах:

- Ф. И. О. 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 отсканированном 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, кегль 14, интервал одинарный. 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 Descrreen. 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

О. С. Валинский, А. М. Евстафьев, А. Н. Сычугов, Е. В. Суханов	Сопоставительная оценка численного интегрирования уравнения движения электропоезда для автоведения	7
А. А. Воробьев, В. Н. Коншина, С. В. Николаев, Э. А. Брехт	Определение минимально допустимого размера искусственного отражателя при ультразвуковом контроле сварных соединений алюминиевых корпусов высоковольтного оборудования, используемого на железнодорожном транспорте	23
А. В. Петряев, А. В. Святогорова, М. С. Мяки	Анализ изменения температурного режима насыпи в криолитозоне Якутии (на примере численного моделирования в COMSOL Multiphysics)	34
И. В. Колос, А. В. Святогорова, М. С. Мяки, К. Р. Никифоров	Обеспечение устойчивости земляного полотна в районах распространения многолетнемерзлых грунтов на примере Амурской области	45
Н. К. Маслов, А. В. Петряев, А. А. Сайдалиев	Оценка влияния подбалластных матов на снижение вибрации	59
Е. П. Дудкин, Я. С. Хомяков	Влияние ширины колеи на устойчивость движения трамвая при повышении скоростей движения	78
С. В. Кириллов	Имитационная математическая модель функционирования участка дороги для промышленного транспорта	93
М. А. Платонова	Многокритериальная оптимизация распределения ресурсов в резервированных комплексах транспортно-технологических машин	103
Т. В. Хмельницкая, А. Ю. Сулимин, А. В. Агунов, А. А. Бобров	Применение новых моделей прогнозирования на основе искусственного интеллекта, новых материалов и новых механизмов для совершенствования системы заземления опор	116

ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Ч. Си	Метод оценки SOH литий-ионных аккумуляторов на основе тренда импеданса	126
Д. Н. Сомов, А. В. Петряев, Н. И. Тенирядко	Определение параметров взаимодействия системы «щебень — георешетка»	138

Е. В. Козин	О факторах, влияющих на точность формирования изображений	155
Е. В. Зверева, Р. А. Ещенко, Е. С. Добросельская, О. И. Чуйко, Я. Д. Новак	Повышение конфиденциальности в образовательных данных: разработка алгоритма обезличивания с использованием AES/GCM и методов перемешивания	165
А. М. Поликарпов, В. С. Меркушева	Использование цифровых платформ при проведении кадастровых работ в 2026 году	188
Н. М. Панченко	Влияние надежности строительных рабочих на производительность комплектов землеройно-транспортной техники	197
Н. М. Панченко, Д. А. Басовский	Оценка влияния надежности элементов строительного процесса на производительность ведущей машины в комплектах землеройно-транспортной техники	206
Е. В. Опарина	Обзор средств роботизации складских терминалов	215

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

А. Н. Федорова, Л. Ф. Казанская	Разработка требований к стандартам в области этики искусственного интеллекта	226
------------------------------------	--	-----

Contents

PROBLEMATIC OF TRANSPORT SYSTEM

O. S. Valinskij, A. M. Evstaf'ev, A. N. Sychugov, E. V. Sukhanov	Comparative Assessment of Numerical Integration of the Equation of Motion of an Electric Train for Automatic Train Operation	7
A. A. Vorob'ev, V. N. Konshina, S. V. Nikolaev, E. A. Brekht	Determining the Minimum Allowable Size of an Artificial Reflector in Ultrasonic Testing of Welded Joints of Aluminum High-Voltage Equipment Housings Used in Railway Transport	23
A. V. Petryaev, A. V. Svyatogorova, M. S. Myaki	Analysis of Temperature Regime Changes in an Embankment within the Permafrost Zone of Yakutia (Based on Numerical Modeling in COMSOL Multiphysics)	34
I. V. Kolos, A. V. Svyatogorova, M. S. Myaki, K. R. Nikiforov	Ensuring the Stability of Subgrade in Permafrost Areas Using the Example of Amur Oblast	45
N. K. Maslov, A. V. Petryaev, A. A. Sajdaliev	Assessment of the Effect of Under-Ballast Mats on Vibration Reduction	59
E. P. Dudkin, Ya. S. Khomyakov	The Impact of Track Gauge on the Stability of the Tram with Increasing Speed	78
S. V. Kirillov	A Simulation Mathematical Model of the Operation of a Road Section for Industrial Transport	93
M. A. Platonova	Multi-Criteria Optimization of Resource Allocation in Redundant Complexes of Transport and Technological Machines	103
T. V. Khmel'nitskaya, A. Yu. Sulimin, A. V. Agunov, A. A. Bobrov	Application of New Forecasting Models Based on Artificial Intelligence, New Materials and New Mechanisms to Improve the Grounding System of Supports	116

GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH

Zh. Xi	Method for Estimating the SOH of Lithium-Ion Batteries Based on the Impedance Trend	126
D. N. Somov, A. V. Petryaev, N. I. Teniryadko	Determination of the Parameters of the Interaction of the Crushed Stone-Geogrid System	138

E. V. Kozin	About the Factors Affecting the Accuracy of Image Formation	155
E. V. Zvereva, R. A. Eshenko, E. S. Dobrosel'skaya, O. I. Chuyko, Y. D. Novak	Improving Privacy in Educational Data: Developing an Anonymization Algorithm Using AES/GCM and Mixing Methods	165
A. M. Polikarpov, V. S. Merkusheva	The Use of Digital Platforms in Carrying out Cadastral Works in 2026	188
N. M. Panchenko	The Influence of the Reliability of Construction Workers on the Productivity of Sets of Earthmoving and Transport Equipment	197
N. M. Panchenko, D. A. Basovskij	Evaluation of the Influence of Reliability of Construction Process Elements on the Performance of the Leading Machine in Earthmoving and Transport Equipment Sets	206
E. V. Oparina	Overview of Warehouse Terminal Roboticization Tools	215

GOVERNANCE AND ECONOMICS

A. N. Fedorova, L. F. Kazanskaya	Developing Requirements for Standards in the Field of Ethics of Artificial Intelligence	226
-------------------------------------	---	-----

ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

УДК 629.4.053

Сопоставительная оценка численного интегрирования уравнения движения электропоезда для автоведения

О. С. Валинский, А. М. Евстафьев, А. Н. Сычугов, Е. В. Суханов

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

Для цитирования: Валинский О. С., Евстафьев А. М., Сычугов А. Н., Суханов Е. В. Сопоставительная оценка численного интегрирования уравнения движения электропоезда для автоведения // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 3. С. 7–22. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-7-22

Аннотация

Цель: сопоставительная оценка вариантов численного интегрирования уравнения продольного движения электропоезда и выявление рациональных сочетаний метода и шага для вычислительного ядра системы автоведения по критериям точности и продолжительности вычислений. **Методы:** рассмотрено интегрирование уравнения продольного движения по времени, скорости и пути с применением отдельных наборов численных методов. При интегрировании по пути дополнительно исследовано энергетическое преобразование уравнения. Для рассматриваемых методов выполнено сопоставительное моделирование режима разгона на четырех вариантах продольного профиля. Точность оценивалась по абсолютным отклонениям конечных значений пути и времени от результатов опорного расчета. Методом Дерринджера — Сьюича сформирован комплексный показатель, учитывающий точность и продолжительность вычислений. **Результаты:** выбор метода интегрирования для вычислительного ядра системы автоведения должен учитывать независимую переменную и величину шага. Расчет по скорости обеспечивает высокое быстродействие на участках ее монотонного изменения, но осложняется при поддержании скорости. Интегрирование по времени удобно, когда необходимо выдержать продолжительность отдельных режимов ведения. Поскольку в обоих вариантах путь является зависимой величиной, изменения уклона, ограничений скорости и управляющих команд, связанных с определенными координатами, могут оказаться внутри шага и должны учитываться отдельно. При расчете по пути координаты этих изменений сразу используются как границы шагов. Для явных методов второго порядка с параметризацией по пути выявлена широкая область значений шага с высоким комплексным показателем по совокупности рассмотренных профилей. **Практическая значимость:** результаты дают возможность выбирать математическую основу вычислительного ядра системы автоведения с учетом требуемого соотношения точности и быстродействия, особенностей исходных зависимостей и области применимости каждого метода.

Ключевые слова: электропоезд, система автоведения, продольное движение, численное интегрирование, метод Дерринджера — Сьюича

Введение

Одним из подходов к построению системы автоведения является формирование управляющих воздействий с помощью предварительного моделирования движения на рассматриваемом участке. В результате определяются зависимости скорости, времени, тяговых и тормозных усилий от пройденного пути. Такое

представление дает возможность учесть продольный профиль и ограничения скорости, связать управление с координатой, определить время движения и расход энергии, а также проверить соблюдение графика [1–3]. В процессе движения расчеты выполняются многократно, поэтому важна их продолжительность.

Наряду с быстродействием предъявляются повышенные требования к точности. Если численная погрешность сопоставима с возможным отклонением фактического движения от расчетного, то становится сложно различить причины расхождения. Погрешность пути смещает координаты управления, а погрешность времени отражается на соблюдении графика и доступном резерве.

Порядок аппроксимации, устойчивость и вычислительные затраты характеризуют численные методы [4–7], но сами по себе не определяют их пригодность для рассматриваемой модели. Одни зависимости изменяются со скоростью, другие связаны с пройденным путем. Выбор независимой переменной определяет, как изменения этих зависимостей учитываются внутри расчетного шага, и тем самым влияет на возникающую погрешность.

Одно уравнение движения можно преобразовать для численного интегрирования по времени, скорости или пути. У каждого варианта есть свои преимущества и ограничения. Особую роль играют точки изменения кусочно-постоянных условий движения. Если такая точка находится внутри шага, функция ускорения на рассматриваемом интервале не является гладкой и повышение формального порядка метода не обязательно уменьшает ошибку. Более мелкий шаг обычно повышает точность, но одновременно увеличивает продолжительность вычислений.

Цель работы состоит в сопоставительной оценке вариантов численного интегрирования уравнения продольного движения электропоезда и выявлении рациональных сочетаний метода и шага для вычислительного ядра системы автоведения по критериям точности и продолжительности вычислений. Для достижения цели рассматриваются математические особенности интегрирования по времени, скорости и пути, выполняется сопоставительное моделирование на нескольких продольных профилях и применяется многокритериальная оценка результатов.

Математические основания выбора метода интегрирования

Продольное движение электропоезда описывается дифференциальным уравнением первого порядка, полученным из баланса силы тяги и сил сопротивления движению. В рассматриваемой постановке учитываются основное сопротивление движению поезда, зависящее от скорости, и дополнительное сопротивление от уклона, зависящее от координаты пути. Учет других составляющих дополнительного сопротивления изменил бы значения действующих сил, но не различия вариантов интегрирования.

Уравнение движения имеет вид:

$$m(1 + \gamma) \frac{dv}{dt} = F_k(v) - W_0(v) - W_i(s),$$

где m — масса поезда;

γ — коэффициент инерции вращающихся масс;

v — скорость;

t — время;

s — путь;

$F_k(v)$ — сила тяги;

$W_0(v)$ — основное сопротивление движению поезда;

$W_i(s)$ — дополнительное сопротивление от уклона.

Ускорение представим в виде:

$$a(v, s) = \frac{F_k(v) - W_0(v) - W_i(s)}{m(1 + \gamma)}.$$

Выбор времени, скорости или пути в качестве независимой переменной определяет преобразование уравнения и последовательность обновления расчетных величин.

Интегрирование по времени

При выборе времени в качестве независимой переменной уравнение движения дополняется кинематическим соотношением для определения приращения скорости и пройденного пути:

$$\frac{dv}{dt} = a(v, s), \quad \frac{ds}{dt} = v.$$

Простейший переход явного метода Эйлера имеет вид:

$$v_{n+1} = v_n + a_n \Delta t, \quad s_{n+1} = s_n + v_n \Delta t, \quad a_n = a(v_n, s_n),$$

где n — номер узла;

a_n — ускорение в начале шага;

Δt — шаг по времени.

Интегрирование по времени не требует монотонного изменения скорости, применимо при различных режимах движения и удобно для выдерживания продолжительности действия команд управления.

Основная трудность связана с условиями, привязанными к пути. Если внутри шага изменяется уклон, ограничение скорости или управляющее воздействие, расчет с прежними условиями вносит дополнительную погрешность. Для ее снижения шаг сокращают до точки изменения, что увеличивает число вычислений.

Интегрирование по скорости

На участке монотонного изменения скорости с ненулевым ускорением:

$$\frac{dt}{dv} = \frac{1}{a(v, s)}, \quad \frac{ds}{dv} = \frac{v}{a(v, s)}.$$

Переход методом Эйлера по приращению скорости записывается как:

$$t_{n+1} = t_n + \frac{\Delta v}{a_n}, \quad s_{n+1} = s_n + \frac{v_n \Delta v}{a_n},$$

где Δv — шаг по скорости.

При интегрировании по скорости последовательность значений независимой переменной известна до начала расчета. В пределах фрагмента с неизменным уклоном это позволяет вычислять подынтегральные функции для массива скоростей и векторизовать однородные операции [8].

При уменьшении модуля ускорения производные времени и пути по скорости возрастают, а при поддержании постоянной скорости независимая переменная не получает приращения, поэтому расчет необходимо продолжить по времени или пути. При смене направления изменения скорости расчет разделяется на монотонные участки. Точки изменения условий, привязанных к пути, обнаруживаются после вычисления приращения пути и требуют уточнения шага.

При расчете могут использоваться квадратурные методы:

$$\Delta t = \int_{v_n}^{v_{n+1}} \frac{dv}{a(v, s)}, \quad \Delta s = \int_{v_n}^{v_{n+1}} \frac{v dv}{a(v, s)}.$$

Помимо прочего, приращения времени и пути могут определяться аналитическим решением локально линеаризованного уравнения. На малом интервале разность силы тяги и сил сопротивления движению представляется линейной функцией приращения скорости:

$$m(1 + \gamma) \frac{d\Delta v}{dt} = k_1 - k_2 \Delta v,$$

где $\Delta v = v - v_n$ — приращение скорости относительно начала интервала;

k_1 — разность силы тяги и сил сопротивления в начале интервала;

k_2 — коэффициент локальной линейной аппроксимации.

При постоянных на интервале коэффициентах вводятся постоянная времени и предельное приращение скорости:

$$T = \frac{m(1 + \gamma)}{k_2}, \quad \Delta v_\infty = \frac{k_1}{k_2}.$$

Время достижения выбранного приращения скорости определяется выражением:

$$\Delta t = -T \ln \left(1 - \frac{\Delta v}{\Delta v_{\infty}} \right). \quad (1)$$

Пройденный за это время путь равен:

$$\Delta s = v_n \Delta t + \Delta v_{\infty} \left[\Delta t - T \left(1 - e^{-\Delta t/T} \right) \right]. \quad (2)$$

При $k_2 \rightarrow 0$ применяется предельное решение для постоянного ускорения. Формулы (1) и (2) являются точными только для локально линеаризованного уравнения. Их отклонение от исходной нелинейной модели определяется погрешностью аппроксимации и учетом изменений условий, привязанных к пути. Уменьшение шага уменьшает погрешность, но увеличивает число вычислений. Замкнутая форма возникает вследствие принятой линеаризации, а к интегрированию по скорости алгоритм относится по способу формирования последовательных интервалов.

Интегрирование по пути

При выборе пути в качестве независимой переменной кинематическая связь скорости с пройденным путем приводит к системе:

$$\frac{dv}{ds} = \frac{a(v, s)}{v}, \quad \frac{dt}{ds} = \frac{1}{v}.$$

Простейший переход явного метода Эйлера имеет вид:

$$v_{n+1} = v_n + \frac{a_n}{v_n} \Delta s, \quad t_{n+1} = t_n + \frac{\Delta s}{v_n},$$

где Δs — шаг по пути.

Положение каждого расчетного узла в этом случае изначально известно. Координаты начала и конца фрагментов продольного профиля, ограничений скорости и управляющих воздействий можно включить в последовательность узлов до начала вычислений. Тогда изменение условий совпадает с границей шага и не требует определения точки пересечения.

Производная скорости для интегрирования по пути содержит обратную скорость, что осложняет расчет в области начала движения. Для более устойчивого описания вводится энергетическое преобразование, дифференцирование которого дает:

$$z = \frac{v^2}{2}, \quad \frac{dz}{ds} = a(\sqrt{2z}, s), \quad \frac{dt}{ds} = \frac{1}{\sqrt{2z}}.$$

Переменная z пропорциональна удельной кинетической энергии и изменяется в соответствии с работой разности силы тяги и сил сопротивления движению на единице массы. Преобразование снижает численную чувствительность при малых скоростях, не изменяя физическую модель. Однако итоговое время остается чувствительным к погрешности скорости на начальном участке.

Вычислительные затраты численных методов

Вычислительные затраты зависят от выбранного численного метода. Для методов Рунге — Кутты они определяются числом стадий, а для неявных вариантов также средним числом итераций [6, 7]. При интегрировании по скорости затраты квадратурных и локальных аналитических алгоритмов зависят от числа вычислений ускорения и состава математических операций. Общие затраты определяются трудоемкостью одного шага и числом шагов на расчетном интервале.

При постоянном шаге число переходов N приближенно определяется длиной L интервала независимой переменной и шагом h . При условно постоянной трудоемкости вычисления ускорения оценки затрат имеют вид:

$$C_{\text{exp}} = O(Nq), \quad C_{\text{imp}} = O(NqI), \quad N \approx \frac{L}{h},$$

где q — число стадий;

I — число итераций неявного метода;

$C_{\text{exp}}, C_{\text{imp}}$ — оценки затрат явного и неявного методов.

В укрупненной асимптотической оценке арифметические операции, возведение в квадрат, вычисление логарифма, экспоненты и квадратного корня при фиксированной разрядности имеют постоянную стоимость $O(1)$. Фактическая продолжительность этих операций различается и входит в постоянные множители. Подсчет отдельных операций уточняет асимптотическую оценку, но охватывает главным образом вычисления, непосредственно определяемые формулами метода.

На продолжительность расчета влияют и сопутствующие действия: интерполяция; проверка достижения координат, в которых меняются условия движения; внутренние итерации и условные переходы. Их состав зависит от независимой переменной. При расчете по пути координаты изменения условий могут совпадать с границами шагов. При расчете по времени или скорости пересечение такой координаты необходимо сначала обнаружить. При этом часть вычислений по скорости можно выполнять над массивами, тогда как переходы по времени и пути преимущественно выполняются последовательно. По этой причине число математических операций не дает полной оценки продолжительности расчета.

Фактическая продолжительность вычислений измерялась для каждой реализованной комбинации метода и шага на одной платформе. В измерение входили вычисления по формулам метода и предусмотренная программой обработка условий движения. Полученные значения характеризуют принятую реализацию и не могут считаться универсальными, однако позволяют сопоставить рассматриваемые варианты в одинаковых условиях. Совместный учет погрешности и времени применяется и при прикладном сравнении численных методов [5].

Методика моделирования и многокритериальной оценки

Исследовался разгон электропоезда с асинхронным тяговым приводом и массой 650 т до 250 км/ч при полном тяговом усилии. Для расчетов были выбраны четыре кусочно-постоянных продольных профиля: площадка, подъем и спуск, два варианта с противоположным порядком чередования подъемов и спусков. Характеристики поезда во всех расчетах оставались неизменными, что обеспечило сопоставление интегрирования по времени, скорости и пути применительно к одному физическому процессу. При интегрировании по скорости взяты 12 значений шага от 0,05 до 10 км/ч, по пути 21 — от 0,05 до 500 м, по времени 14 — от 0,05 до 20 с.

При интегрировании по скорости сопоставлены методы левых и правых прямоугольников, средней точки, трапеций, обычный и адаптивный методы Симпсона, формулы Гаусса — Лежандра с двумя и тремя узлами и три локально-аналитических варианта. При интегрировании по пути использованы явные методы Эйлера, средней точки, Хойна, Ралстона, Рунге — Кутты третьего и четвертого порядков и трехстадийный метод Рунге — Кутты третьего порядка с сохранением монотонности SSPRK3, или метод Шу — Ошера. Среди неявных методов рассмотрены методы Кранка — Николсона, Гаусса — Лежандра и двухстадийный диагонально неявный метод Рунге — Кутты второго порядка SDIRK2. Для применимых методов сопоставлены непосредственное интегрирование скорости и энергетическое преобразование. При интегрировании по времени использованы явные и неявные методы Эйлера и средней точки, метод Хойна, метод Кранка — Николсона и методы Рунге — Кутты третьего и четвертого порядков.

Первый формальный порядок имеют методы Эйлера и прямоугольников, второй — методы средней точки, трапеций, Хойна, Ралстона, Кранка — Николсона и SDIRK2, третий — методы Рунге — Кутты третьего порядка и SSPRK3, четвертый — классический метод Рунге — Кутты и двухузловая формула Гаусса — Лежандра. Для гладкой подынтегральной функции формула Симпсона также имеет четвертый порядок, а трехузловая формула Гаусса — Лежандра — шестой [6, 7].

Указанные порядки справедливы для гладких зависимостей и точного вычисления промежуточных стадий. Переходы между фрагментами профиля и интерполяция ускорения во внутренних узлах квадратур нарушают эти условия, поэтому формальный порядок непосредственно не определяет фактическую погрешность. Для локальных аналитических вариантов единый порядок не назначался, поскольку их точность зависит от локальной аппроксимации разности сил.

Способ учета изменения уклона зависел от выбранной независимой переменной. При интегрировании по пути координаты переходов между фрагментами профиля использовались как границы шагов. В расчете по скорости и времени переход на следующий фрагмент профиля определялся по накопленному пути, где значения в соответствующей координате затем уточнялись линейной интерполяцией.

Завершение расчета во всех вариантах соответствовало одной конечной скорости. Если шаг по времени или пути пересекал это значение, то использовалась только необходимая часть шага. Приращения времени и пути для этой части определялись по кинематической зависимости с ускорением в начале шага. В расчете по скорости конечные значения пути и времени уточнялись линейной интерполяцией на последнем интервале. Таким образом, для всех вариантов сохранялось одинаковое условие завершения, но решение на последнем шаге оставалось приближенным.

Опорный расчет выполнялся локальным аналитическим методом при интегрировании по скорости с шагом 0,001 км/ч. Это значение в 50 раз меньше минимального скоростного шага, включенного в основное сопоставление. Опорный расчет не является аналитическим решением полной нелинейной модели, однако малое приращение и замкнутое решение локально линеаризованного уравнения позволяют использовать его как единую основу сравнения.

Для каждого сочетания метода и шага определялись отклонения конечных значений пути и времени:

$$\Delta S = |S - S_{\text{ref}}|, \quad \Delta T = |T - T_{\text{ref}}|,$$

где S, T — конечные путь и время исследуемого варианта;

$S_{\text{ref}}, T_{\text{ref}}$ — конечные путь и время опорного расчета.

Для сопоставления профилей использовались относительные ошибки:

$$\varepsilon_S = 100 \frac{\Delta S}{S_{\text{ref}}}, \quad \varepsilon_T = 100 \frac{\Delta T}{T_{\text{ref}}}.$$

Конечные ошибки передают накопленный результат при достижении заданной скорости, но не максимальное расхождение внутри участка, поскольку локальные отклонения могут частично компенсироваться.

Продолжительность вычислений измерялась на одной программно-аппаратной платформе. Расчеты выполнены в Python с использованием библиотеки NumPy [8]. Полученные значения предназначены для относительного сопоставления реализованных методов и непосредственно не переносятся на другие программно-аппаратные условия.

Для совместного учета двух ошибок и продолжительности вычислений применен метод Дерринджера — Сьюича [9]. Для каждого показателя, подлежащего минимизации, вводилась безразмерная частная оценка:

$$d(x) = \begin{cases} 1, & x \leq x_1, \\ \left(\frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} \right)^\mu, & x_1 < x < x_2, \\ 0, & x \geq x_2, \end{cases}$$

где x — оцениваемое значение;

μ — параметр крутизны перехода;

x_1, x_2 — границы безусловно приемлемой и неприемлемой области.

Приняты параметры крутизны $\mu_s = 1,9$, $\mu_T = 2,5$ и $\mu_\tau = 5,5$.

Для относительных ошибок пути и времени границы x_1 и x_2 субъективно установлены равными соответственно 0,04 и 0,08 %. Для продолжительности вычислений границы определялись внутри общего диапазона измеренных значений:

$$\tau_1 = \tau_{\min} + 0,02(\tau_{\max} - \tau_{\min}), \quad \tau_2 = \tau_{\min} + 0,08(\tau_{\max} - \tau_{\min}),$$

где $\tau_{\min}$, $\tau_{\max}$ — минимальная и максимальная продолжительности;

τ_1, τ_2 — границы приемлемой и неприемлемой продолжительности.

Комплексный показатель для одного профиля вычислялся как взвешенное геометрическое среднее [10]:

$$D = \left(d_s^{w_s} d_T^{w_T} d_\tau^{w_\tau} \right)^{1/(w_s + w_T + w_\tau)},$$

где d_s, d_T, d_τ — частные оценки ошибки пути, времени и длительности;

w_s, w_T, w_τ — веса частных оценок.

Геометрическое среднее не допускает компенсации полностью неприемлемого значения. Параметры и веса отражают принятое соотношение требований и не являются универсальными. Веса ошибок пути, времени и продолжительности вычислений приняты равными 3, 4,5 и 2 соответственно.

Для каждого сочетания метода и шага комплексные показатели по четырем профилям суммировались:

$$D_\Sigma(M, h) = \sum_{r=0}^3 D(M, h, P_r),$$

где M — исследуемый метод;

h — шаг интегрирования;

P_r — вариант профиля;

D_Σ — суммарный комплексный показатель по четырем профилям.

Максимально возможное значение оценки равно 4 и достигается, если все частные показатели находятся в безусловно приемлемой области на каждом профиле. Суммарный показатель не устанавливает обязательного ранга методов, а выявляет сочетания, сохраняющие принятый уровень точности и быстродействия при изменении продольного профиля.

Сопоставительное моделирование

Для каждого сочетания независимой переменной, метода, шага и профиля выполнена серия последовательных расчетов. Продолжительность вычислений определялась как их суммарное время, что уменьшало относительное влияние

случайных колебаний и обеспечивало сопоставимость вариантов. Полученные ошибки конечных значений пути и времени, а также продолжительность вычислений первоначально представлены в виде трехсекторных тепловых карт. По горизонтали расположены исследуемые методы, по вертикали указаны значения шага соответствующей независимой переменной. Каждая ячейка характеризует одно сочетание метода и шага. Левый сектор содержит абсолютную ошибку пути в метрах. В верхнем секторе приведена абсолютная ошибка времени в секундах, а в нижнем правом — суммарная продолжительность вычислений в миллисекундах. Зеленый цвет соответствует безусловно приемлемой области, желтый обозначает переходную область, красный соответствует неприемлемой области. На рис. 1 приведен пример такой карты для интегрирования по пути на одном продольном профиле. Он показывает форму представления исходных результатов, на основе которых далее рассчитывался комплексный показатель. Аналогичные карты сформированы для остальных вариантов.

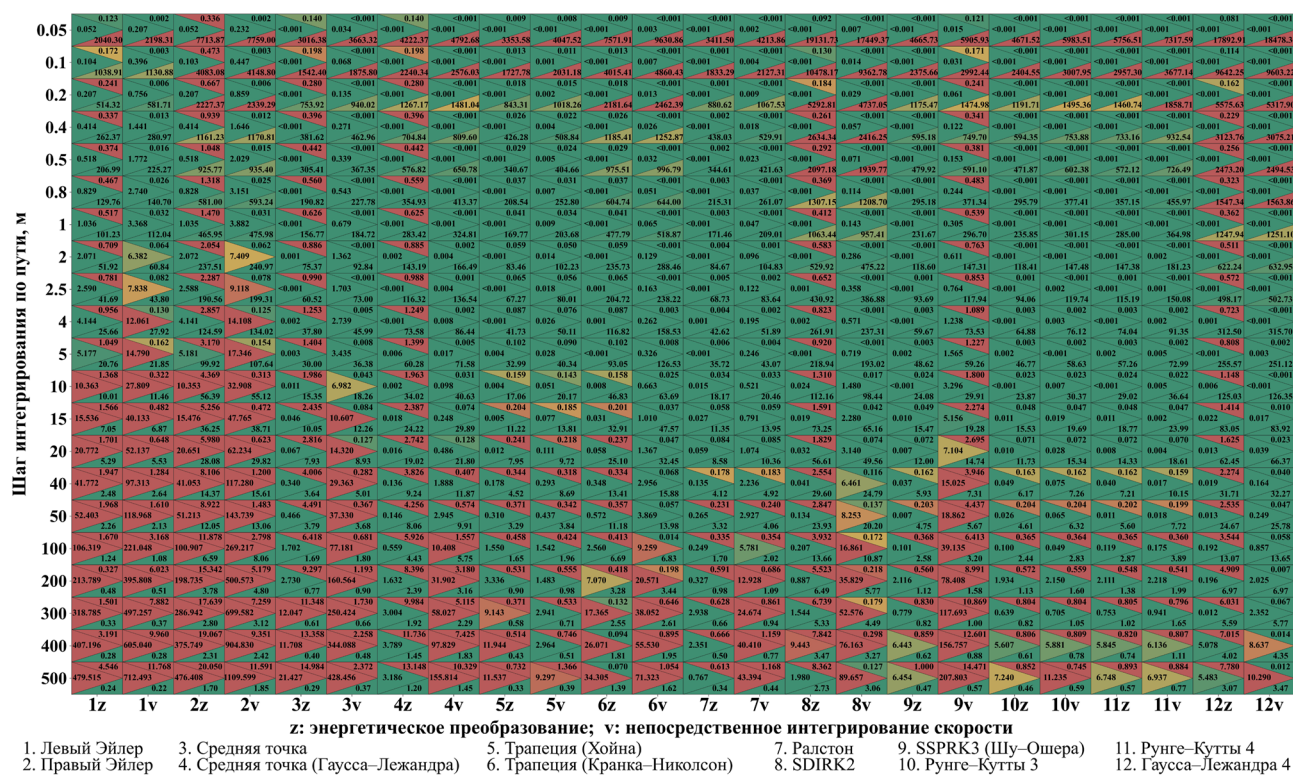


Рис. 1. Пример представления ошибок пути, времени и продолжительности вычислений при интегрировании по пути для одного профиля

Полная карта сохраняет исходные численные значения, но при большом числе вариантов становится перегруженной, поэтому дальнейшее сопоставление выполнено по суммарному комплексному показателю. В последующих картах строки соответствуют методам, а столбцы — шагам. Значение 4 соответствует

безусловно приемлемой области для всех частных показателей на каждом профиле, а меньшие значения отражают ухудшение результатов или их физическую недопустимость.

На рис. 2 представлен показатель при интегрировании по скорости.



Рис. 2. Суммарный комплексный показатель сочетаний метода и шага при интегрировании по скорости

При интегрировании по скорости большинство квадратурных и локальных аналитических методов достигают максимального комплексного показателя при шагах от 0,1 до 1 км/ч. С уменьшением шага различия между методами среднего и высокого порядка сокращаются, поскольку погрешность определяется также локальной аппроксимацией ускорения. Немонотонные изменения показателя связаны с совпадением расчетных узлов с точками изменения профиля или конечной скоростью и компенсацией локальных отклонений.

На рис. 3 представлен показатель при интегрировании по пути.

При интегрировании по пути явные методы второго, третьего и четвертого порядков образуют широкую область высоких значений показателя при шагах от единиц до десятков метров. Наиболее стабильными оказались методы Ралстона, средней точки, Хойна, SSPRK3 и Рунге — Кутты, а перекрытие их приемлемых областей позволяет выбирать шаг по допустимым вычислительным затратам. Малые шаги увеличивают продолжительность вычислений, крупные приводят к росту ошибок или физически недопустимому результату, а неявные методы из-за внутренних итераций не показали общего преимущества. Энергетическое преобразование устраняет деление на скорость в уравнении основной переменной, но время остается чувствительным к начальной ошибке скорости. Каждый фрагмент продольного профиля рассчитывался при неизменных условиях, поскольку координаты смены уклона, ограничений и управляющих воздействий использовались как границы шагов.

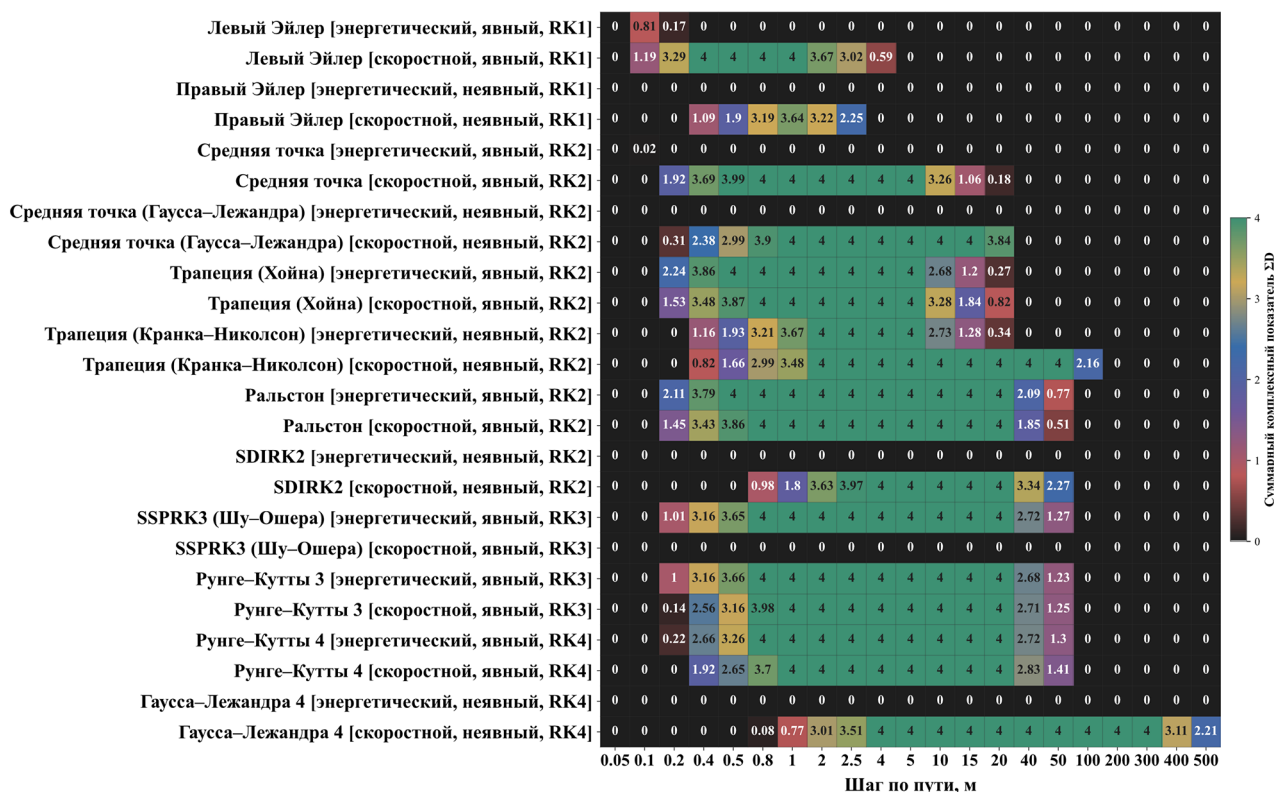


Рис. 3. Суммарный комплексный показатель сочетаний метода и шага при интегрировании по пути

На рис. 4 представлен показатель при интегрировании по времени.

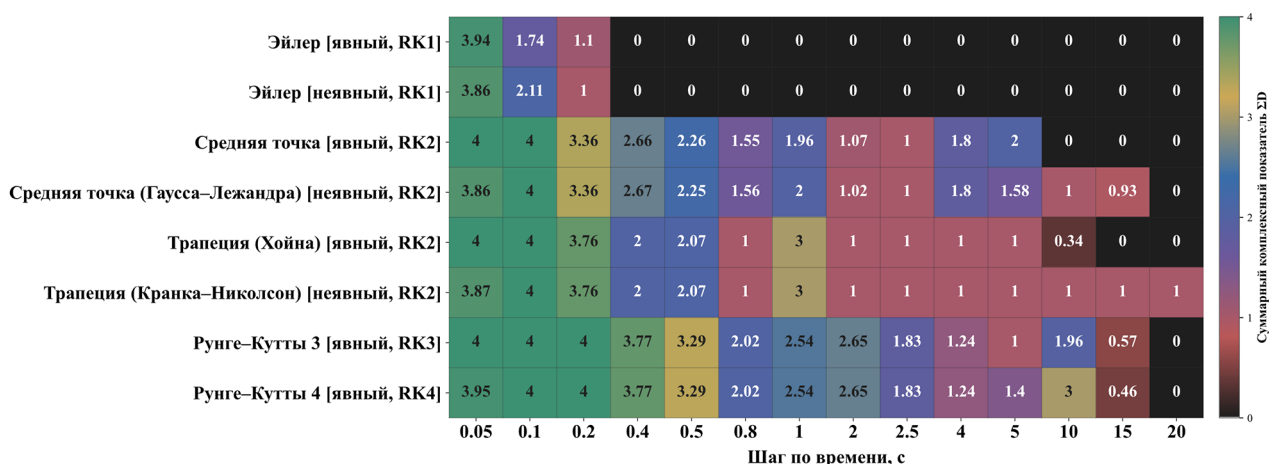


Рис. 4. Суммарный комплексный показатель сочетаний метода и шага при интегрировании по времени

Наибольшие значения комплексного показателя при интегрировании по времени получены для шагов от 0,05 до 0,2 с. Методы Рунге — Кутты высоких порядков сохраняли приемлемые результаты и при отдельных, более крупных шагах. Для

методов Эйлера приемлемым оказался только минимальный шаг. Различия зависели не только от формального порядка, но и от попадания точек изменения условий внутрь расчетного интервала. Интегрирование по времени применимо при различных режимах и удобно для выдерживания продолжительности команд. Условия, связанные с пройденным путем, при этом приходится учитывать отдельно.

Совместный анализ не выявил универсального сочетания независимой переменной, метода и шага. Для каждой независимой переменной сформировался собственный диапазон сочетаний, удовлетворяющих принятым ограничениям. При этом для системы автоведения, в которой профиль, ограничения и команды представлены как функции пути, преимущество имеет интегрирование по пути.

Полученные диапазоны справедливы для исследованного разгона и выбранных показателей. Оценка конечных ошибок не отражает величину отклонений внутри участка, а измеренное время относится к конкретной программной реализации. Эти ограничения сужают интерпретацию чисел, но не изменяют выявленных различий между независимыми переменными.

Заключение

В работе сопоставлены варианты интегрирования уравнения продольного движения электропоезда по времени, скорости и пути. Для каждого варианта одновременно изменялись численный метод и шаг, а оценка учитывала точность и продолжительность вычислений. Расчеты подтвердили, что преимущество более высокого формального порядка зависит от структуры исходных зависимостей и обработки точек изменения условий движения.

Ошибки пути и времени вместе с продолжительностью вычислений были сведены в комплексный показатель методом Дерринджера — Сьюича. Он позволил определить не единственный метод, а совокупность сочетаний, удовлетворяющих установленным требованиям. При интегрировании по пути наиболее широкий диапазон подходящих шагов получен для явных методов второго порядка на всех четырех продольных профилях. Эти сочетания могут рассматриваться как рациональные варианты математической основы вычислительного ядра системы автоведения.

Полученные результаты характеризуют моделирование режима разгона. При построении полного алгоритма движения учет торможения, выбега, поддержания скорости и переключения управляющих усилий может создавать дополнительные ограничения и изменять сравнительные преимущества методов. Поэтому окончательный выбор независимой переменной, метода и шага должен учитывать допустимые погрешности, доступное время пересчета, структуру исходных зависимостей и рассматриваемые условия движения.

Список источников

1. Внедрение системы автоведения для повышения точности управления и энергоэффективности высокоскоростного электропоезда / О. С. Валинский [и др.] // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2025. Т. 22, вып. 1. С. 7–18. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-7-18
2. Юренко К. И., Фандеев Е. И. Принципы построения и имитационное моделирование систем автоведения электроподвижного состава // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 8 (181). С. 88–102. DOI: 10.18522/2311-3103-2016-8-88-102
3. Юренко К. И., Савоськин А. Н., Фандеев Е. И. Математическое моделирование энергооптимальных режимов ведения поезда с учетом возмущений // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2015. № 3 (184). С. 34–44. DOI: 10.17213/0321-2653-2015-3-34-44
4. Абляимов О. С. Уравнение движения поезда и некоторые методы его решения // Universum: технические науки. 2020. № 9 (78). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/10715> (дата обращения: 23.07.2026).
5. Абляимов О. С. Эффективность решения дифференциальных уравнений вида $y' = f(x, y)$ методом хорд // Universum: технические науки. 2020. № 9 (78). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/10713> (дата обращения: 23.07.2026).
6. Butcher J. C. Implicit Runge–Kutta Processes // Mathematics of Computation. 1964. Vol. 18, no. 85. Pp. 50–64. DOI: 10.1090/S0025-5718-1964-0159424-9
7. Kennedy C. A., Carpenter M. H. Diagonally Implicit Runge–Kutta Methods for Ordinary Differential Equations: A Review. NASA/TM-2016-219173. Hampton: NASA Langley Research Center, 2016.
8. Array Programming with NumPy / C. R. Harris [et al.] // Nature. 2020. Vol. 585. Pp. 357–362. DOI: 10.1038/s41586-020-2649-2
9. Derringer G., Suich R. Simultaneous Optimization of Several Response Variables // Journal of Quality Technology. 1980. Vol. 12, no. 4. Pp. 214–219. DOI: 10.1080/00224065.1980.11980968
10. Derringer G. C. A Balancing Act: Optimizing a Product's Properties // Quality Progress. 1994. Vol. 27, no. 6. Pp. 51–58.

Дата поступления: 21.06.2026

Решение о публикации: 11.08.2026

Контактная информация:

ВАЛИНСКИЙ Олег Сергеевич — кандидат техн. наук, профессор; rector@pgups.ru

ЕВСТАФЬЕВ Андрей Михайлович — доктор техн. наук, профессор; evstafev@pgups.ru

СЫЧУГОВ Антон Николаевич — кандидат техн. наук, доцент; sychugov@pgups.ru

СУХАНОВ Евгений Владимирович — аспирант, ассистент; sukhanov.ev.genii@yandex.ru

Comparative Assessment of Numerical Integration of the Equation of Motion of an Electric Train for Automatic Train Operation

O. S. Valinskij, A. M. Evstaf'ev, A. N. Sychugov, E. V. Sukhanov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

For citation: Valinskij O. S., Evstaf'ev A. M., Sychugov A. N., Sukhanov E. V. Comparative Assessment of Numerical Integration of the Equation of Motion of an Electric Train for Automatic Train Operation // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 3, pp. 7–22. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-7-22 (In Russian)

Abstract

Objective: comparative assessment of variants of numerical integration of the longitudinal equation of motion of an electric train and identification of rational combinations of method and step size for the computational core of an automatic train operation system according to the criteria of accuracy and computation time. **Methods:** integration of the longitudinal equation of motion with respect to time, speed and distance was considered using separate sets of numerical methods. For integration with respect to distance, an energy transformation of the equation was additionally investigated. For the methods considered, comparative simulation of the electric train in acceleration mode was performed for four variants of the longitudinal profile. Accuracy was evaluated by the absolute deviations of the final values of distance and time from the reference calculation results. The Derringer–Suich method was used to form a composite indicator accounting for accuracy and computation time. **Results:** the choice of integration method for the computational core of an automatic train operation system should take into account the independent variable and step size. Integration with respect to speed provides high computational performance over intervals of monotonic speed change, but the calculation becomes more complicated when speed is maintained. Integration with respect to time is convenient when the duration of individual driving modes has to be maintained. Since in both cases the path is a dependent variable, changes in slope, speed limits and control commands associated with certain coordinates may occur within a step and must be taken into account separately. When integration is performed with respect to distance, the coordinates of these changes are used directly as step boundaries. For explicit second-order methods used for integration with respect to distance, a broad range of step sizes with a high composite indicator was identified across the profiles considered. **Practical significance:** the results make it possible to select the mathematical basis for the computational core of an automatic train operation system, taking into account the required balance between accuracy and computational performance, the features of the input dependencies and the applicability range of each method.

Keywords: electric train, automatic train operation, longitudinal motion, numerical integration, Derringer–Suich method

References

1. Valinskij O. S., et al. Vnedrenie sistemy avtovedeniya dlya povysheniya tochnosti upravleniya i energoeffektivnosti vysokoskorostnogo elektropoezda [Implementation of an Automatic Train Operation System to Improve Control Accuracy and Energy Efficiency of a High-Speed Electric Train], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya [Proceedings of the Petersburg Transport University]*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 7–18. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-7-18 (In Russian)
2. Yurenko K. I., Fandeev E. I. Principy postroeniya i imitacionnoe modelirovanie sistem avtovedeniya elektropodvizhnogo sostava [Principles of Design and Simulation Modeling of

Automatic Train Operation Systems for Electric Rolling Stock], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Proceedings of Southern Federal University. Engineering Sciences]*, 2016, no. 8 (181), pp. 88–102. DOI: 10.18522/2311-3103-2016-8-88-102 (In Russian)

3. Yurenko K. I., Savoskin A. N., Fandeev E. I. Matematicheskoe modelirovanie energo-optimalnykh rezhimov vedeniya poezda s uchetom vozmushchenij [Mathematical Modeling of Energy-Optimal Train Operation Modes Considering Disturbances], *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Tekhnicheskie nauki [Proceedings of Higher Educational Institutions. North Caucasian Region. Engineering Sciences]*, 2015, no. 3 (184), pp. 34–44. DOI: 10.17213/0321-2653-2015-3-34-44 (In Russian)

4. Ablyalimov O. S. Uravnenie dvizheniya poezda i nekotorye metody ego resheniya [Train Motion Equation and Some Methods for Its Solution], *Universum: tekhnicheskie nauki [Universum: Engineering Sciences]*, 2020, no. 9 (78). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/10715> (accessed: July 23, 2026). (In Russian)

5. Ablyalimov O. S. Effektivnost' resheniya differentsialnykh uravnenij vida $y' = f(x, y)$ metodom hord [Efficiency of Solving Differential Equations of the Form $y' = f(x, y)$ by the Chord Method], *Universum: tekhnicheskie nauki [Universum: Engineering Sciences]*, 2020, no. 9 (78). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/10713> (accessed: July 23, 2026). (In Russian)

6. Butcher J. C. Implicit Runge–Kutta Processes, *Mathematics of Computation*, 1964, vol. 18, no. 85, pp. 50–64. DOI: 10.1090/S0025-5718-1964-0159424-9

7. Kennedy C. A., Carpenter M. H. Diagonally Implicit Runge–Kutta Methods for Ordinary Differential Equations: A Review. NASA/TM-2016-219173. Hampton: NASA Langley Research Center, 2016.

8. Harris C. R., et al. Array Programming with NumPy, *Nature*, 2020, vol. 585, pp. 357–362. DOI: 10.1038/s41586-020-2649-2

9. Derringer G., Suich R. Simultaneous Optimization of Several Response Variables, *Journal of Quality Technology*, 1980, vol. 12, no. 4, pp. 214–219. DOI: 10.1080/00224065.1980.11980968

10. Derringer G. C. A Balancing Act: Optimizing a Product's Properties, *Quality Progress*, 1994, vol. 27, no. 6, pp. 51–58.

Received: June 21, 2026

Accepted: August 11, 2026

Author's information:

Oleg S. VALINSKIY — PhD in Engineering, Professor; rector@pgups.ru

Andrej M. EVSTAF'EV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; evstafev@pgups.ru

Anton N. SYCHUGOV — PhD in Engineering, Associate Professor; sychugov@pgups.ru

Evgenij V. SUKHANOV — Postgraduate Student, Teaching Assistant; sukhانov.ev.genii@yandex.ru

УДК 620.179.16

Определение минимально допустимого размера искусственного отражателя при ультразвуковом контроле сварных соединений алюминиевых корпусов высоковольтного оборудования, используемого на железнодорожном транспорте

А. А. Воробьев, В. Н. Коншина, С. В. Николаев, Э. А. Брехт

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

Для цитирования: Воробьев А. А., Коншина В. Н., Николаев С. В., Брехт Э. А. Определение минимально допустимого размера искусственного отражателя при ультразвуковом контроле сварных соединений алюминиевых корпусов высоковольтного оборудования, используемого на железнодорожном транспорте // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 3. С. 23–33. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-23-33

Аннотация

Цель: разработка современной нормативной базы для ультразвукового контроля (УЗК) сварных соединений корпусов высоковольтного оборудования из алюминиевых сплавов, применяемого на железнодорожном транспорте, в связи с концептуальным устареванием действующей методики. **Методы:** проведен критический анализ существующей методики по РД 24.201.07-90 с выявлением ее ключевых недостатков, главным из которых является использование угла призмы в качестве основного параметра контроля вместо общепринятого в современной практике угла ввода. Экспериментально определена скорость распространения поперечных ультразвуковых волн в сплаве АМгЗ. Выполнены механические испытания образцов с искусственными отражателями (пропилами) для установления корреляции между размерами дефектов и амплитудой эхо-сигнала. **Результаты:** получено точное значение скорости поперечных волн в сплаве АМгЗ, необходимое для корректной настройки дефектоскопического оборудования. На основе экспериментальных данных обоснованы и предложены новые значения чувствительности контроля и браковочные уровни, которые отличаются от предписанных ГОСТ ISO 11666 и учитывают специфические акустические свойства алюминиевых сплавов. **Практическая значимость:** предложенные решения позволяют актуализировать методику УЗК сварных соединений алюминиевых корпусов высоковольтного оборудования, обеспечить достоверность выявления дефектов в соответствии с современными требованиями безопасности на железнодорожном транспорте и создать основу для разработки обновленного нормативного документа взамен устаревшего РД 24.201.07-90.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, алюминиевые сплавы, сварные соединения, неразрушающий контроль, чувствительность, угол ввода, технологическая инструкция

В условиях модернизации энергетического комплекса, используемого на железнодорожном транспорте, широкое применение находят комплектные распределительные устройства с элегазовой изоляцией (КРУЭ). Корпуса данных устройств, в том числе высоковольтных трансформаторов типов ТГФМ-110 (рис. 1), ТГФМ-220 и ТГФМ-500, выполняются из алюминиевых сплавов (преимущественно АМгЗ), что позволяет уменьшить температуру нагрева, вызванного переменными магнитными полями, и массу оборудования [1]. Соединения выполняются с помощью стыковых сварных соединений типа С17 по ГОСТ 14806-80 [5],

соединяющих элементы корпуса толщиной 8, 10 и 12 мм. Материал — термоупрочненный алюминиевый сплав АМг3 (нормативное сопротивление разрыву — 185 Н/мм^2 , относительное удлинение — 12–15 %).



Рис. 1. Трансформатор высоковольтный ТГФМ-110. Фото С. В. Николаева

Одним из наиболее ответственных этапов изготовления КРУЭ является соединение элементов корпусов посредством дуговой сварки в среде инертных газов [2]. Сложность процесса сварки алюминиевых сплавов связана с наличием тугоплавкой оксидной пленки, а также с недостаточным уровнем технологической дисциплины и опыта сварщиков, что приводит к возникновению дефектов, представленных на рис. 2. Значительную долю (до 38 %) составляют плоскостные дефекты — несплавления и непровары, являющиеся концентраторами напряжений, которые впоследствии приводят к разрушению корпуса в целом [1].

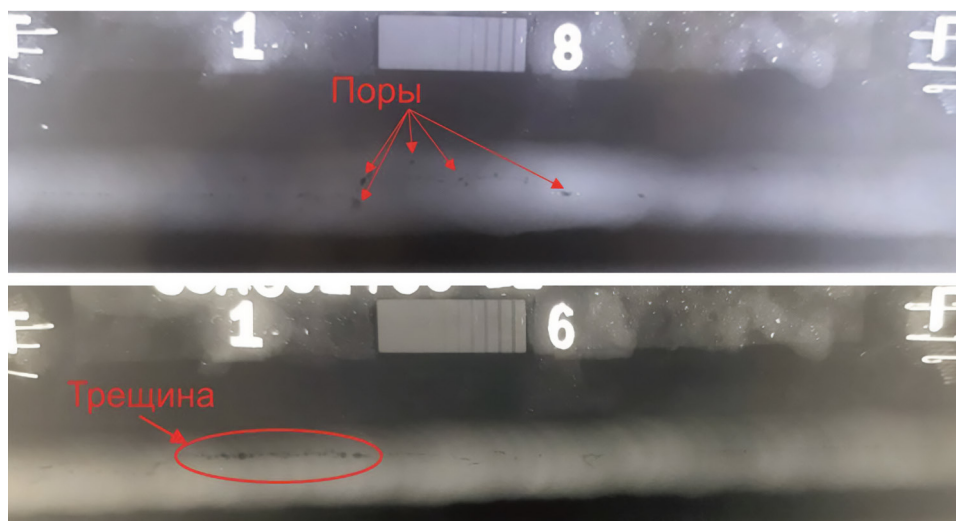


Рис. 2. Радиографические снимки участков сварных швов корпусов. Фото С. В. Николаева

Действующая в настоящее время нормативная и технологическая документация по УЗК данных сварных соединений, в частности РД 24.201.07-90 [4], имеет неопределенный статус на территории РФ и содержит ряд устаревших требований. В частности, в качестве параметра контроля в РД 24.201.07-90 фигурирует угол призмы, что некорректно при использовании современных материалов (полиамида, рексолита). Значения скорости звука в этих материалах отличаются от оргстекла, что приведет к изменению угла ввода в контролируемом материале. Отдельные положения нормативно-технических документов [5, 6] носят рамочный характер и требуют адаптации для конкретных условий производства.

ГОСТ ISO 11666 [20] распространяется на УЗК сварных соединений из ферритных сталей, но допускается его применение и при контроле других материалов при учете акустических свойств и гарантий того, что достигается достаточная чувствительность при реализации предусмотренных им уровней приемки.

Поэтому необходимо решить две задачи: подтвердить адекватность акустических свойств и возможность реализации соответствующей чувствительности.

Определение времени распространения поперечных ультразвуковых волн с последующим пересчетом скорости (формула (1)) в материале объекта контроля является критически важным этапом. Это связано с тем, что от этого параметра зависят пересчет углов ввода, выбор ПЭП и точность измерения координат дефектов. На поверхности плиты было размечено 10 точек, расположенных по диагональной сетке с шагом 50 мм. Измерения времени (по пять измерений в каждой точке) прохождения между первым и вторым донным сигналом проводились на плите из сплава АМгЗ (фактически полученной из того же проката, что и корпуса) номинальной толщиной 45,0 мм. Результаты приведены в таблице.

$$C_t = 2 \cdot h / \Delta t, \quad (1)$$

где h — толщина плиты в точке измерения, мм;

Δt — время между первым и вторым донным сигналом, мкс.

В результате экспериментальных исследований было получено, что скорость распространения поперечных ультразвуковых волн в корпусе трансформатора составляет 3,20 мм/мкс, что соответствует скорости в стали [21] и позволяет точно произвести измерения координат дефектов.

В связи с тем, что в настоящее время отсутствуют нормативные требования к проведению ультразвукового контроля по выявлению минимально допустимого дефекта (браковочной чувствительности), необходимо определить значение чувствительности. ГОСТ ISO 11666 [20] предусматривает несколько способов настройки чувствительности, в том числе и по пропилу глубиной 1 мм и шириной 1 мм. Необходимо оценить возможность достижения такого значения с учетом требований к объекту контроля, чтобы избежать недобраковки и перебраковки.

Испытания образцов из алюминия на растяжение проводились в ФГБОУ ВО ПГУПС, ИЛ «Механическая лаборатория им. проф. Н. А. Белелюбского» с помощью универсальной машины для статических испытаний с гидравлическим приводом Satec 1200KN-J3D, представленной на рис. 4. Машина предназначена для проведения измерений физических параметров материалов и изделий при статических испытаниях на растяжение, сжатие, изгиб и отслаивание.



Рис. 4. Satec 1200KN-J3D. Фото С. В. Николаева

По результатам проведенных механических испытаний были определены механические свойства образцов с пропилами на разрыв и относительное удлинение алюминия согласно требованиям нормативного документа [3].

Сопротивление на разрыв для плит из алюминиевого сплава соответствующей марки для толщин от 10,5 до 25,0 мм включительно в состоянии без термической обработки должно составлять 185 Н/мм^2 . Зависимость усилия на разрыв от глубины пропила представлена на рис. 5.

Относительное удлинение образца из алюминиевого сплава соответствующей марки для толщин от 10,5 до 25,0 мм включительно в состоянии без термической обработки должно составлять не более 12 % [3]. Зависимость относительного удлинения от глубины пропила представлена на рис. 6.

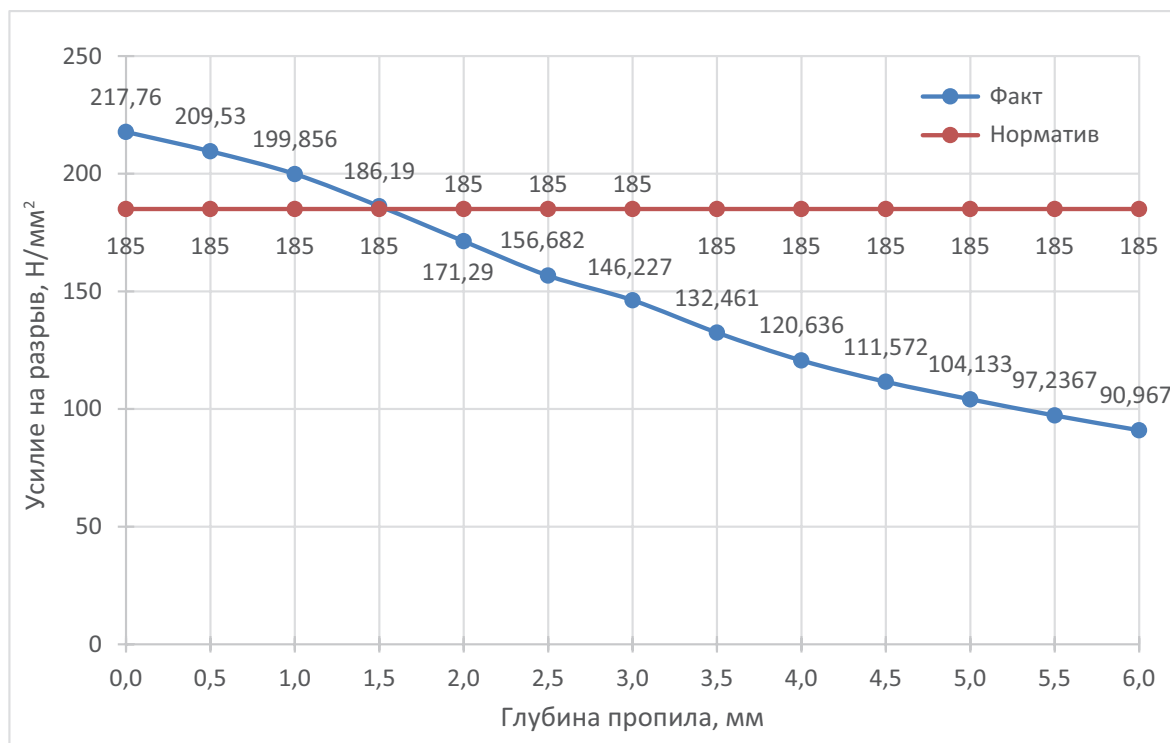


Рис. 5. Зависимость усилия на разрыв от глубины пропила

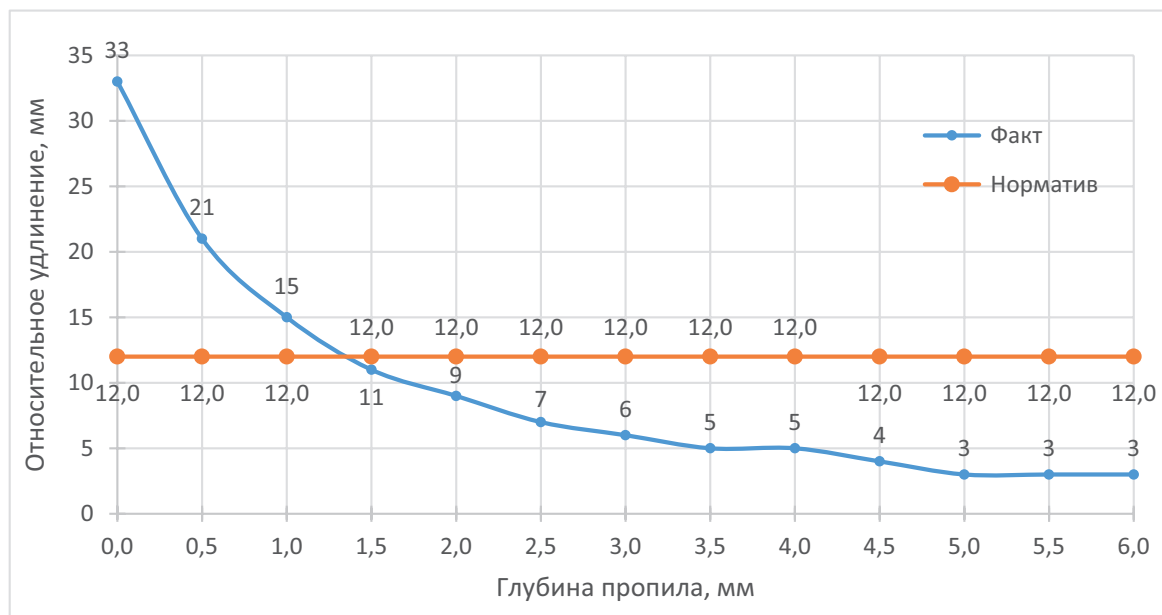


Рис. 6. Зависимость относительного удлинения от глубины пропила

Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что нормативное временное сопротивление разрыву без учета относительного удлинения обеспечивается для образца толщиной 12,0 мм с пропилом глубиной 1,5 мм. С учетом нормативного относительного удлинения для образца толщиной 12,0 мм минимально допустимый пропил для обеспечения механических свойств — 1,0 мм.

В результате проведенных экспериментальных исследований механических свойств установлено, что с целью определения минимального допустимого дефекта (браковочной чувствительности), а также для установления значений параметров ультразвукового контроля сварных швов толщиной 12,0 мм целесообразно использовать образец шириной 30,0 мм с глубиной пропила 1,0 мм, что соответствует требованиям ГОСТ ISO 11666 [20].

Таким образом, экспериментально подтверждена возможность применения ГОСТ ISO 11666 [20] в качестве основного нормативного документа по УЗК сварных соединений корпусов высоковольтного оборудования из алюминиевых сплавов, используемого на железнодорожном транспорте, что снимает существующую в настоящее время неопределенность при разработке технологической документации по УЗК.

Исследования, выполняемые по данной тематике, проводились в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет-2030».

Список источников

1. Электрические станции: производственно-технический журнал. 2002. № 10.
2. РД 24.201.07-90. Швы сварных соединений сосудов и аппаратов из алюминия и его сплавов. Методика ультразвукового контроля // УкрНИИхиммаш. М., 1990.
3. ГОСТ 17232-2023. Плиты из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия. М.: Российский институт стандартизации, 2023. 24 с.
4. ГОСТ 21631-2023. Листы из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия. М.: Российский институт стандартизации, 2023. 42 с.
5. ГОСТ 14806-80. Дуговая сварка алюминия и алюминиевых сплавов в инертных газах. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. М.: Госстандарт СССР, 1980. 37 с.
6. Технологическая инструкция на сборку-сварку и пайку металлоконструкций. СПб.: Электроаппарат, 2019. 86 с.
7. ГОСТ 10157-2016. Аргон газообразный и жидкий. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2016. 27 с.
8. Сварки и свариваемые материалы: справочник в 3 т. / В. Н. Волченко [и др.]. Т. I. Свариваемость материалов. М.: Металлургия, 1991. 527 с.
9. Николаев Г. А., Куркин С. А., Винокуров В. А. Расчет, проектирование и изготовление сварных конструкций. М.: Высшая школа, 1970. 759 с.
10. ГОСТ Р ИСО 10042-2022. Сварка. Сварные соединения из алюминия и его сплавов, полученные дуговой сваркой. Уровни качества. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 24 с.
11. Преобразователи ультразвуковые «Ультратех». URL: <https://ut-4dl.ru/datchiki.html>

12. REXOLITE 1422 // REXOLITE. Phil. 2023. URL: <https://rexolite.com/rexolite/>
13. ГОСТ Р ИСО 17640-2016. Неразрушающий контроль сварных соединений. Ультразвуковой контроль. Технология, уровни контроля и оценки. М.: Стандартинформ, 2016. 30 с.
14. ГОСТ Р 55724-2013. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые. М.: Стандартинформ, 2014. 31 с.
15. Р Газпром 2-2.3-322-2009. Рекомендации по ультразвуковому контролю качества сварных соединений газопроводов и дефектных участков, отремонтированных сваркой (наплавкой). М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2009. 123 с.
16. Наклонные совмещенные преобразователи П121 // Константа-УЗК. СПб., 2024. URL: https://www.constant-us.com/catalog/naklonnye_sovmeshchennye_preobrazovateli_p121/
17. Ультразвуковые преобразователи «ВЕЛМАС LT3» // ВЕЛМАС. СПб., 2024. URL: <https://velmas.ru/ultrazvukovye-defektoskopy/ulrazvukovye-preobrazovateli/ultrazvukovye-preobrazovateli-velmas-lt3/>
18. Наклонный совмещенный преобразователь П121-5-73-400 (УАЛТ.011.748.00) // Константа-УЗК. СПб., 2024. URL: https://www.constant-us.com/catalog/naklonnye_sovmeshchennye_preobrazovateli_p121/p121_5_73_400_ualt_011_748_00/
19. Ультразвуковой преобразователь П121-5-70-LT3 // ВЕЛМАС. СПб., 2024. URL: <https://velmas.ru/ultrazvukovye-defektoskopy/ulrazvukovye-preobrazovateli/ultrazvukovoj-preobrazovatel-p121-5-70-lt3/>
20. ГОСТ ISO 11666-2024. Неразрушающий контроль сварных соединений. Ультразвуковой контроль. Уровни приемки. М.: Стандартинформ, 2024. 19 с.
21. Кретов Е. Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в машиностроении. СПб.: СВЕН, 2014.

Дата поступления: 31.05.2026

Решение о публикации: 01.08.2026

Контактная информация:

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич — доктор техн. наук, профессор; 79219751198@yandex.ru

КОНШИНА Вера Николаевна — кандидат техн. наук, доцент; nttk@pgups.ru

НИКОЛАЕВ Сергей Викторович — кандидат техн. наук, доцент; nttk@pgups.ru

БРЕХТ Эдуард Александрович — аспирант; nttk@pgups.ru

Determining the Minimum Allowable Size of an Artificial Reflector in Ultrasonic Testing of Welded Joints of Aluminum High-Voltage Equipment Housings Used in Railway Transport

A. A. Vorob'ev, V. N. Konshina, S. V. Nikolaev, E. A. Brekht

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

For citation: Vorob'ev A. A., Konshina V. N., Nikolaev S. V., Brekht E. A. Determining the Minimum Allowable Size of an Artificial Reflector in Ultrasonic Testing of Welded Joints of Aluminum High-Voltage Equipment Housings Used in Railway Transport // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 3, pp. 23–33. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-23-33 (In Russian)

Abstract

Objective: the development of a modern regulatory framework for ultrasonic testing (UT) of welded joints of high-voltage equipment housings made of aluminum alloys used in railway transport, prompted by the conceptual obsolescence of the current methodology. **Methods:** a critical analysis of the existing methodology according to RD 24.201.07-90 was carried out, identifying its key shortcomings, the principal one being the use of the wedge angle as the main inspection parameter instead of the beam angle commonly accepted in modern practice. The velocity of shear ultrasonic waves in AMg3 alloy was experimentally determined. Mechanical tests were performed on specimens with artificial reflectors (slits) to establish a correlation between defect sizes and echo-signal amplitude. **Results:** an accurate value of the shear wave velocity in AMg3 alloy, necessary for correct flaw detector calibration, was obtained. Based on the experimental data, new inspection sensitivity values and rejection levels were substantiated and proposed, which differ from those prescribed by GOST ISO 11666 and take into account the specific acoustic properties of aluminum alloys. **Practical significance:** the proposed solutions make it possible to update the UT methodology for welded joints of aluminum high-voltage equipment housings, ensure the reliability of defect detection in accordance with modern safety requirements in railway transport, and create a basis for developing an updated regulatory document to replace the outdated RD 24.201.07-90.

Keywords: ultrasonic testing, aluminum alloys, welded joints, non-destructive testing, sensitivity, beam angle, technological instruction

References

1. Elektricheskie stancii: proizvodstvenno-tekhnicheskij zhurnal [Electric Power Stations. Industrial and Technical Journal], 2002, no. 10. (In Russian)
2. RD 24.201.07-90. Shvy svarnyh soedinenij sosudov i apparatov iz alyuminiya i ego splavov. Metodika ul'trazvukovogo kontrolya [Welded Joints of Vessels and Apparatus Made of Aluminium and Its Alloys. Ultrasonic Testing Methodology], UkrNIIkhimmash [Ukrainian Scientific Research and Design Institute of Chemical Engineering], Moscow, 1990. (In Russian)
3. GOST 17232-2023. Plity iz alyuminiya i alyuminievyh splavov. Tekhnicheskie usloviya [State Standard 17232-2023. Aluminium and Aluminium Alloy Plates. Technical Specifications], Moscow, Rossijskij institut standartizatsii [Russian Institute for Standardization], 2023, 24 p. (In Russian)
4. GOST 21631-2023. Listy iz alyuminiya i alyuminievyh splavov. Tekhnicheskie usloviya [State Standard 21631-2023. Aluminium and Aluminium Alloy Sheets. Technical Specifications], Moscow, Rossijskij institut standartizatsii [Russian Institute for Standardization], 2023, 42 p. (In Russian)

5. GOST 14806-80. Dugovaya svarka alyuminiya i alyuminievyh splavov v inertnyh gazah. Soedineniya svarnye. Osnovnye tipy, konstruktivnye elementy i razmery [State Standard 14806-80. Arc Welding of Aluminium and Aluminium Alloys in Inert Gases. Welded Joints. Basic Types, Design Elements and Dimensions], Moscow: Gosstandart SSSR, 1980, 37 p. (In Russian)
6. Tekhnologicheskaya instrukciya na sborku-svarku i pajku metallokonstrukcij [Technological Instructions for Assembly, Welding and Brazing of Metal Structures], St. Petersburg, Elektroapparat [Electrical Equipment], 2019, 86 p. (In Russian)
7. GOST 10157-2016. Argon gazoobraznyj i zhidkij. Tekhnicheskie usloviya [State Standard 10157-2016. Gaseous and Liquid Argon. Technical Specifications], Moscow, Standartinform, 2016, 27 p. (In Russian)
8. Volchenko V. N., et al. Svarki i svarivaemye materialy: spravochnik v 3 t. T. I. Svarivaemost' materialov [Welding and Weldable Materials. Handbook in Three Volumes. Vol. I. Weldability of Materials], Moscow, Metallurgiya [Metallurgy], 1991, 527 p. (In Russian)
9. Nikolaev G. A., Kurkin S. A., Vinokurov V. A. Raschet, proektirovanie i izgotovlenie svarnyh konstrukcij [Calculation, Design and Fabrication of Welded Structures], Moscow, Vysshaya shkola [Higher School], 1970, 759 p. (In Russian)
10. GOST R ISO 10042-2022. Svarka. Svarnye soedineniya iz alyuminiya i ego splavov, poluchennye dugovoj svarkoj. Urovni kachestva [State Standard R ISO 10042-2022. Welding. Arc-Welded Joints in Aluminium and Its Alloys. Quality Levels], Moscow, Rossijskij institut standartizatsii [Russian Institute for Standardization], 2022, 24 p. (In Russian)
11. Preobrazovateli ul'trazvukovye "Ul'tratekh" [Ultrasonic Transducers "Ultratekh"]. (In Russian)
12. REXOLITE 1422, REXOLITE, Philadelphia, 2023. URL: <https://rexolite.com/rexolite/>
13. GOST R ISO 17640-2016. Nerazrushayushchij kontrol' svarnyh soedinenij. Ul'trazvukovoj kontrol'. Tekhnologiya, urovni kontrolya i ocenki [State Standard R ISO 17640-2016. Non-Destructive Testing of Welded Joints. Ultrasonic Testing. Technology, Testing Levels and Evaluation], Moscow, Standartinform, 2016, 30 p. (In Russian)
14. GOST R 55724-2013. Kontrol' nerazrushayushchij. Soedineniya svarnye. Metody ul'trazvukovye [State Standard R 55724-2013. Non-Destructive Testing. Welded Joints. Ultrasonic Methods], Moscow, Standartinform, 2014, 31 p. (In Russian)
15. R Gazprom 22.3322-2009. Rekomendacii po ul'trazvukovomu kontrolyu kachestva svarnyh soedinenij gazoprovodov i defektnyh uchastkov, otremonirovannyh svarkoj (naplavkoj) [Recommendations for Ultrasonic Quality Control of Welded Joints in Gas Pipelines and Defective Areas Repaired by Welding (Overlay)], Moscow, Gazprom VNIIGAZ, 2009, 123 p. (In Russian)
16. Naklonnye sovmeshchyonnye preobrazovateli P121 [Angled Combined Transducers P121], Konstanta-UZK, St. Petersburg, 2024. URL: https://www.constant-us.com/catalog/naklonnye_sovmeshchennye_preobrazovateli_p121/ (In Russian)
17. Ul'trazvukovye preobrazovateli "VELMAS LT3" [Ultrasonic Transducers "VELMAS LT3"], VELMAS, St. Petersburg, 2024. URL: <https://velmas.ru/ultrazvukovye-defektoskopy/ultrazvukovye-preobrazovateli/ultrazvukovye-preobrazovateli-velmas-lt3/> (In Russian)

18. Naklonnyj sovmeshchyonnyj preobrazovatel' P121-5-73-400 (UALT.011.748.00) [Angled Combined Transducer P121-5-73-400 (UALT.011.748.00)], Konstanta-UZK, St. Petersburg, 2024. URL: https://www.constant-us.com/catalog/naklonnye_sovmeshchennye_preobrazovateli_p121/p121_5_73_400_ualt_011_748_00/ (In Russian)
19. Ul'trazvukovoj preobrazovatel' P121-5-70-LT3 [Ultrasonic Transducer P121-5-70-LT3], VELMAS, St. Petersburg, 2024. URL: <https://velmas.ru/ultrazvukovye-defektoskopy/ultrazvukovye-preobrazovateli/ultrazvukovoj-preobrazovatel-p121-5-70-lt3/> (In Russian)
20. GOST ISO 11666-2024. Nerazrushayushchij kontrol' svarnyh soedinenij. Ul'trazvukovoj kontrol'. Urovni priemki [State Standard ISO 11666-2024. Non-Destructive Testing of Welded Joints. Ultrasonic Testing. Acceptance Levels], Moscow, Standartinform, 2024, 19 p. (In Russian)
21. Kretov E. F. Ul'trazvukovaya defektoskopiya v mashinostroenii [Ultrasonic Flaw Detection in Mechanical Engineering], St. Petersburg, SVEN, 2014. (In Russian)

Received: May 31, 2026

Accepted: August 01, 2026

Author's information:

Aleksandr A. VOROB'EV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; 79219751198@yandex.ru

Vera N. KONSHINA — PhD in Engineering, Associate Professor; ntk@pgups.ru

Sergej V. NIKOLAEV — PhD in Engineering, Associate Professor; ntk@pgups.ru

Eduard A. BREKHT — Postgraduate Student; ntk@pgups.ru

УДК 625.12

Анализ изменения температурного режима насыпи в криолитозоне Якутии (на примере численного моделирования в COMSOL Multiphysics)

А. В. Петряев, А. В. Святогорова, М. С. Мяки

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

Для цитирования: *Петряев А. В., Святогорова А. В., Мяки М. С.* Анализ изменения температурного режима насыпи в криолитозоне Якутии (на примере численного моделирования в COMSOL Multiphysics) // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 3. С. 34–44. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-34-44

Аннотация

В статье представлены результаты численного моделирования теплового режима в криолитозоне, расположенной в Центральной Якутии (район с резко континентальным климатом и распространением многолетнемерзлых грунтов). **Цель:** выполнить численный анализ изменения температурного режима железнодорожной насыпи и многослойного основания, расположенных в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых грунтов Центральной Якутии с учетом фазовых переходов «вода — лед» и сезонных колебаний климатических факторов. **Методы:** в работе использован метод конечно-элементного моделирования нестационарных процессов теплопереноса в программном комплексе COMSOL Multiphysics. **Результаты:** установлены характерные особенности распределения температур в теле насыпи и основании в зимний и летний периоды. **Практическая значимость:** полученные данные могут быть использованы при проектировании линейных сооружений (железных и автомобильных дорог) в криолитозоне для обоснования необходимости применения конструктивных мероприятий.

Ключевые слова: многолетнемерзлые грунты, криолитозона, численное моделирование, сезонное оттаивание, железные дороги

Введение

Освоение территорий с суровыми климатическими условиями, в частности Республики Саха (Якутия), требует особого подхода к проектированию линейных сооружений. Транспортная инфраструктура в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ) подвержена высоким рискам деформаций, связанных с изменением температурного поля основания при строительстве и эксплуатации [1, 5]. Нарушение теплового равновесия может привести к оттаиванию грунтов, развитию осадок, что влечет за собой снижение безопасности движения и увеличение затрат на ремонт [7].

Классические аналитические методы не всегда позволяют учесть нелинейность процессов теплопереноса, зависимость теплофизических свойств от температуры и фазовые переходы поровой влаги [3]. Для прогнозирования деградации мерзлоты при изменении климата активно применяются методы численного

моделирования [9]. В связи с этим актуальным является применение конечно-элементного моделирования. Данная работа посвящена анализу изменения температур в насыпи и основании в течение 5 лет эксплуатации с использованием программного комплекса COMSOL Multiphysics. Результаты позволяют оценить глубину сезонного промерзания и оттаивания, а также выявить зоны потенциально опасных температурных изменений.

Описание района строительства

В качестве объекта исследования выбран участок железной дороги в Центральной Якутии. Климат района резко континентальный, характеризуется продолжительной зимой (до 7–8 месяцев) с низкими температурами (средняя температура января — от -38 до -42 °C) и коротким летом (средняя температура июля — от $+18$ до $+20$ °C). Суммарная продолжительность безморозного периода не превышает 90–100 дней [5].

Глубина сезонного оттаивания естественных грунтов (в ненарушенных условиях) варьируется от 1,2 до 2,0 м в зависимости от типа грунта и влажности [8]. Долгосрочный мониторинг в Центральной Якутии подтверждает увеличение глубины сезонного протаивания на техногенно-нарушенных территориях [10].

Геологический разрез:

1. Насыпь: супесь пылеватая, средней плотности, влажность — 14–16 %.

2. Основание:

- слой 1 (0–2,5 м): суглинок текучепластичный, влажность — 20–22 %, степень влажности — $> 0,8$;

- слой 2 (2,5–5,0 м): песок средней крупности, насыщенный водой;

- слой 3 (5,0–12,0 м): суглинок полутвердый, криогенного строения.

Температура грунтов на глубине нулевых годовых амплитуд (10–15 м) составляет от $-1,5$ до $-2,0$ °C, что указывает на наличие многолетнемерзлой толщи (сплошное распространение). Проектная высота насыпи — 2,5 м, ширина основной площадки — 12 м, заложение откосов — 1:1,5.

Описание метода расчета в программе COMSOL Multiphysics

Численное моделирование выполнено в двумерной постановке (плоская деформация) в модуле Heat Transfer in Porous Media (Heat Transfer Module) [4]. Выбор двумерного профиля (поперечное сечение насыпи и основания) позволяет адекватно оценить влияние атмосферных факторов и боковой теплоотдачи на температурное поле [6].

Основные допущения

1. Грунты рассматриваются как трехкомпонентные пористые среды (скелет, вода, лед) [3].

2. Теплофизические характеристики грунтов зависят от температуры и фазового состояния воды.

3. Фильтрация влаги в поровом пространстве не учитывается (задача решается в сопряженной тепловой постановке, без учета массопереноса, что является консервативным подходом для оценки температур) [2, 6].

4. Фазовый переход «вода — лед» происходит в интервале температур от 0 до $-0,5$ °C с использованием метода эффективной теплоемкости [4].

Базовые уравнения теплопереноса

Уравнение теплопроводности с учетом фазового перехода в пористой среде имеет вид [4, 6]:

$$(\rho C_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k_{eff} \nabla T) = Q, \quad (1)$$

где T — температура, °C (или °K);

t — время, с;

$(\rho C_p)_{eff}$ — эффективная объемная теплоемкость среды, Дж/(м³·K);

k_{eff} — эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·K).

Эффективные свойства рассчитываются на основе объемного усреднения свойств компонентов (скелет, вода, лед):

$$(\rho C_p)_{eff} = \theta_s (\rho C_p)_s + \theta_w (\rho C_p)_w + \theta_i (\rho C_p)_i, \quad (2)$$

$$k_{eff} = \theta_{sk} + \theta_{wk} + \theta_{ik}, \quad (3)$$

где θ_s , θ_w , θ_i — объемные доли скелета, воды и льда соответственно, подчиняющиеся условию $\theta_s + \theta_w + \theta_i = 1$.

Учет фазового перехода

Для учета скрытой теплоты фазового перехода используется метод эквивалентной теплоемкости [2, 4]. В интервале температур фазового перехода $[T_m - \Delta T, T_m + \Delta T]$ эффективная теплоемкость определяется как:

$$C_{eff}(T) = (\rho C_p)_{eff} + L \frac{\partial \theta_w}{\partial T}, \quad (4)$$

где L — удельная скрытая теплота фазового перехода воды (334 кДж/кг);

$\frac{\partial \theta_w}{\partial T}$ — скорость изменения содержания незамерзшей воды с температурой.

Функция содержания незамерзшей воды аппроксимируется экспоненциальной зависимостью (на основе экспериментальных данных для супесей и суглинков):

$$\theta_w(T) = \begin{cases} \theta_{w0}, & T > T_m + \Delta T \\ \theta_{w0} \cdot \exp(\beta \cdot (T - T_m)), & T_m - \Delta T \leq T \leq T_m + \Delta T, \\ 0 & T < T_m - \Delta T \end{cases} \quad (5)$$

где β — эмпирический коэффициент, характеризующий скорость вымерзания влаги.

Начальные и граничные условия

Начальное условие: распределение температуры по глубине задано на 1 января (конец периода максимального сезонного промерзания). Принимается линейная зависимость температуры от глубины, характерная для установившегося режима в криолитозоне [5]:

$$T(z, 0) = T_{\text{surf}} + \Gamma \cdot z, \quad (6)$$

где T_{surf} — приведенная температура на поверхности;

Γ — геотермический градиент.

Граничные условия:

1. На поверхности грунта и откосах насыпи: задано граничное условие 3-го рода (конвективный теплообмен и солнечная радиация в упрощенном виде через эквивалентную температуру наружного воздуха $T_{\text{air}}(t)$) [2, 4]:

$$-k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_{\text{air}}(t)), \quad (7)$$

где $\partial T / \partial n$ — производная температуры по внешней нормали к поверхности, °С/м;
 α — коэффициент теплоотдачи на поверхности (принимается 15–20 Вт/(м²·К) с учетом ветрового режима) [6];

T — температура поверхности грунта, °С;

$T_{\text{air}}(t)$ — температура наружного воздуха, изменяющаяся во времени, °С.

Температура наружного воздуха задавалась в виде гармонической функции с годовым периодом и поправкой на среднегодовую температуру [2, 8]:

$$T_{\text{air}}(t) = T_{\text{avg}} + A_{\text{amp}} \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{365} + \phi\right). \quad (8)$$

Параметры: среднегодовая температура $T_{\text{avg}} = -8,5$ °С, амплитуда $A_{\text{amp}} = 35$ °С, начальная фаза ϕ соответствует минимальной температуре в январе.

2. На нижней границе основания (глубина — 15 м): условие теплового потока, соответствующего геотермическому потоку Земли ($q = 0,05$ Вт/м²), либо фиксированная температура $T = -2,0$ °С (постоянная).

3. На боковых границах: условие тепловой изоляции (симметрия) на расстоянии 15 м от оси насыпи.

Параметризация материалов

Теплофизические свойства материалов заданы с учетом их состояния (талое/мерзлое). Для каждого слоя (супесь, суглинок, песок) в COMSOL созданы узлы Porous Material с переключением свойств при фазовом переходе [4].

ТАБЛИЦА. Теплофизические характеристики грунтов [3, 7]

Материал	Плотность скелета, кг/м ³	Теплопроводность (тал./мерз.), Вт/(м·К)	Теплоемкость (тал./мерз.), кДж/(кг·К)
Супесь (насыпь)	1700	1,2/1,8	1,1 / 0,9
Суглинок (сл. 1,3)	1850	1,1/1,7	1,2/1,0
Песок (сл. 2)	1950	1,5/2,1	1,0/0,8

Примечание: влажность (суммарная) принята: для супеси — 0,18, суглинка — 0,25, песка — 0,22 (доля незамерзшей воды при 0 °С составляла 0,05–0,1) [7].

Реализация в COMSOL

Расчет выполнен на неструктурированной сетке с локальным сгущением в зоне насыпи и верхней части основания (максимальный размер элемента — 0,1 м) [4]. Использовался временной решатель с автоматическим контролем шага (BDF) для нестационарных задач. Период расчета — 5 лет (1825 дней) с шагом вывода результатов 30 дней [6].

Результаты расчета

В данном разделе представлены результаты численного моделирования температурного режима.

Изотермы показывают глубину промерзания до 4,5 м под бровкой насыпи, наличие непромерзающей зоны под центром насыпи отсутствует. Максимальные отрицательные температуры на поверхности откоса достигают –35 °С. Расчет представлен на рис. 1.

Формирование талого «стакана» под насыпью. Глубина сезонного оттаивания под подошвой насыпи составляет 1,8 м. Температура на поверхности насыпи достигает +24 °С. Многолетнемерзлые грунты основания (суглинок) сохраняются ниже глубины 4,0 м. Расчет представлен на рис. 2.

Представлены кривые изменения температуры на глубинах: 0,5 м (тело насыпи), 2,5 м (подошва насыпи / верх основания), 5,0 м (слой песка), 10,0 м (нижний суглинок) за 5 лет. Наблюдается затухание амплитуды колебаний с глубиной и наличие тренда к повышению среднегодовой температуры на глубине 5 м на 0,3 °С за 5 лет. Расчет представлен на рис. 3.

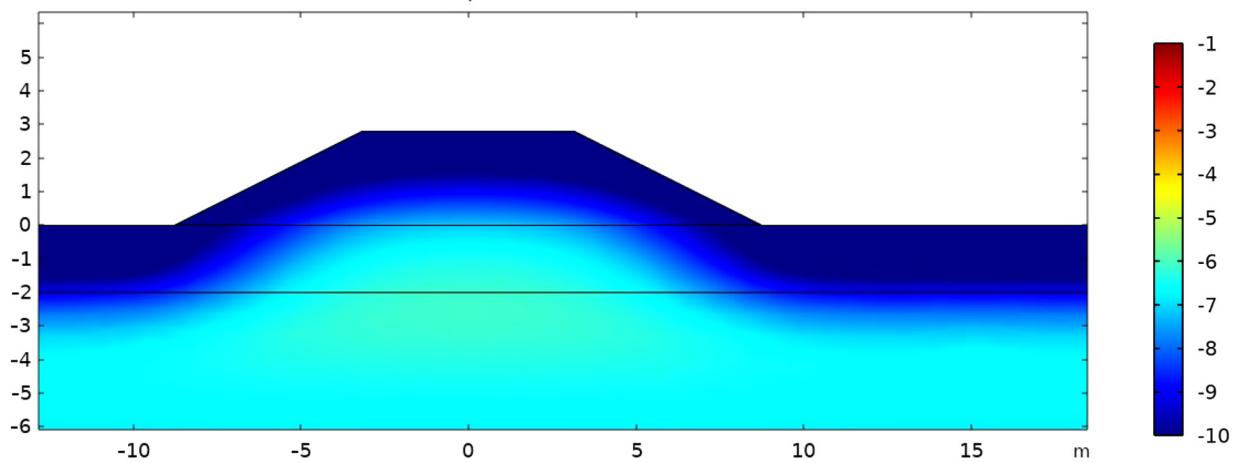


Рис. 1. Распределение температур в поперечном сечении насыпи через 1 год (зима)

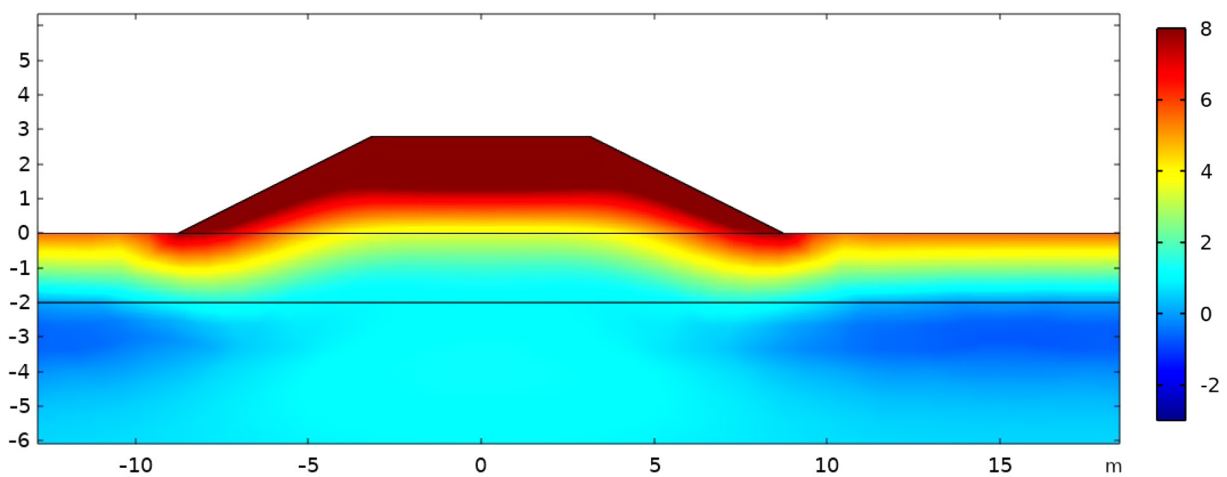


Рис. 2. Распределение температур в поперечном сечении насыпи через 1 год (лето)

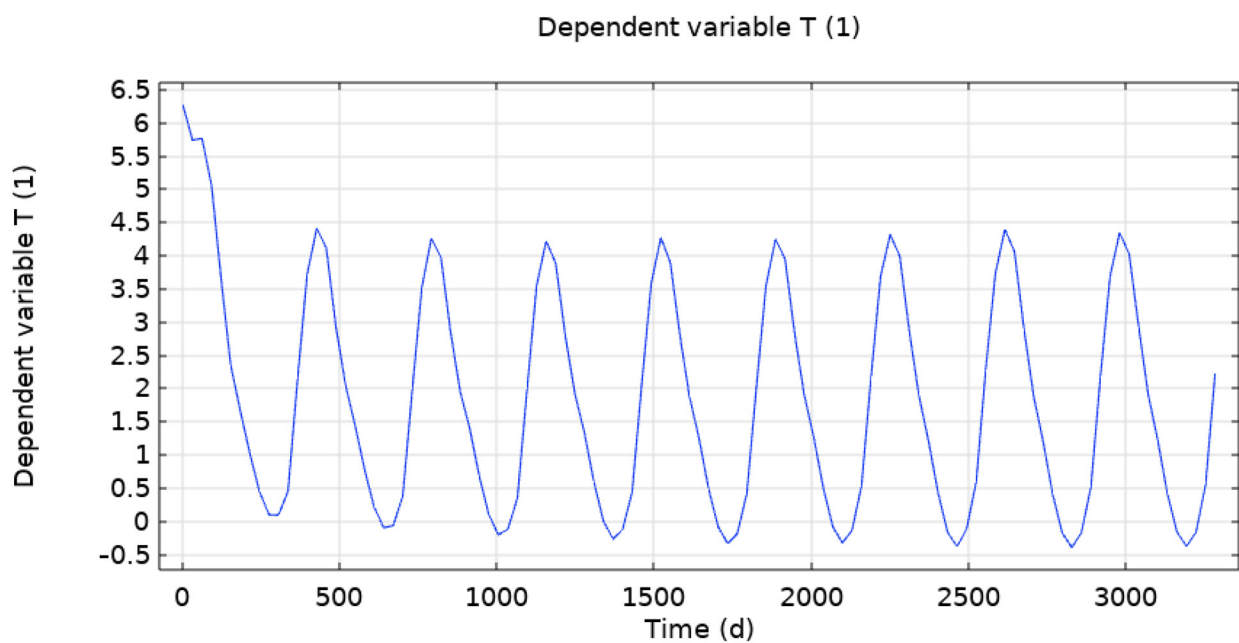


Рис. 3. График изменения температуры грунтов земляного полотна во времени

График показывает максимальную глубину оттаивания в конце каждого летнего периода. За 5 лет глубина сезонного оттаивания увеличилась с 2,0 до 2,2 м, что свидетельствует о постепенном накоплении тепла в основании. Расчет представлен на рис. 4.

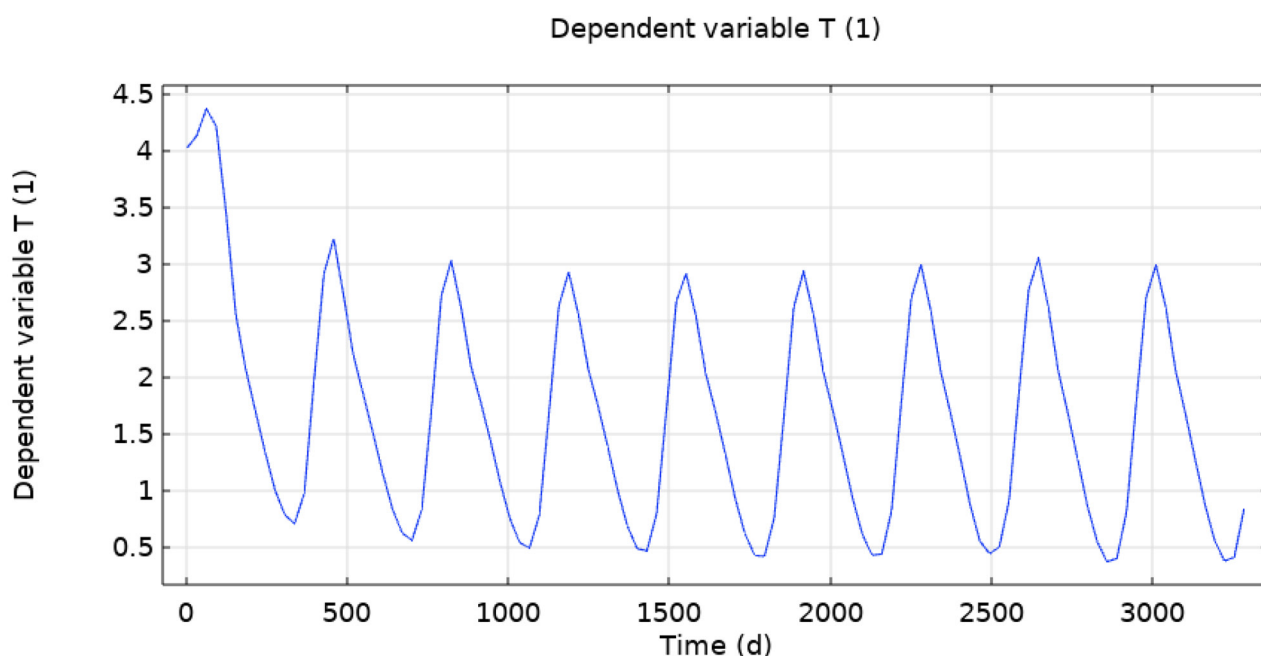


Рис. 4. Динамика положения фронта оттаивания (глубина нулевой изотермы) по оси насыпи

Анализ результатов

Полученные результаты позволяют сделать ряд выводов о тепловом взаимодействии дорожной насыпи с многолетнемерзлым основанием:

1. Асимметрия температурного поля. Моделирование показало, что из-за различий в инсоляции южного и северного откосов (в условиях реального рельефа) наблюдается некоторая асимметрия изотерм. Однако в рамках принятой упрощенной модели (учет только конвекции) наибольшее влияние на тепловой режим оказывает высота насыпи. Насыпь высотой 2,5 м обеспечивает сохранение мерзлоты в основании при условии отсутствия техногенных нарушений [1, 5]. Однако, как показано в [9], инсоляция откосов разной экспозиции может вносить коррективы в температурное поле.

2. Эволюция температурного поля во времени. На графиках изменения температур (рис. 3) четко прослеживается затухание годовых колебаний с глубиной. На глубине 10 м амплитуда колебаний составляет менее 0,5 °С. Важно отметить, что в слое песка (слой 2) наблюдается эффект теплового буфера: высокий коэффициент теплопроводности песка способствует не только более быстрому отводу

тепла зимой, но и ускоряет проникновение тепла летом. За 5 лет расчетного периода выявлен незначительный ($0,2\text{--}0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$) рост среднегодовой температуры на глубине заложения кровли многолетнемерзлых пород (5–6 м). Это может быть связано с аккумуляцией тепла в теле насыпи [2, 8].

3. Динамика оттаивания. Увеличение глубины сезонного оттаивания на 0,4 м за 5 лет (рис. 4) не является критическим для данного региона, однако указывает на тенденцию к деградации мерзлоты при отсутствии охлаждающих устройств (например, вентилируемых труб или теплоизоляции) [5]. На Амуро-Якутской магистрали аналогичные условия потребовали применения термоизоляционных мероприятий [9]. При проектировании на более длительный срок (25–50 лет) данная тенденция может привести к переходу основания из пластичномерзлого состояния в талое, что чревато осадками [1].

4. Ограничения модели. Важно отметить, что принятое допущение об отсутствии фильтрации влаги может приводить к занижению скорости конвективного переноса тепла в песчаном слое (слой 2), особенно в период оттаивания [2]. Для уточнения прогноза деформаций рекомендуется дальнейшее развитие модели в направлении связанного термогидродинамического расчета (ТНМ — Thermo-Hydro-Mechanical) [6].

Выводы

1. В результате выполнения численного моделирования в программном комплексе COMSOL Multiphysics установлено, что температурный режим насыпи высотой 2,5 м и многослойного основания в условиях Центральной Якутии характеризуется устойчивой динамикой промерзания и оттаивания.

2. За пятилетний период эксплуатации глубина сезонного оттаивания под подошвой насыпи увеличилась с 2,1 до 2,5 м. Несмотря на это, кровля многолетнемерзлых грунтов (суглинков на глубине 5 м) сохраняет отрицательные температуры (от $-1,0$ до $-0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$), что свидетельствует о сохранении мерзлотного состояния основания на данный период.

3. Эффективная объемная теплоемкость и зависимость содержания незамерзшей воды от температуры, реализованная через функцию фазового перехода, оказали существенное влияние на кинетику промерзания. Учет этих параметров является обязательным для корректного прогноза.

4. Полученные данные могут быть использованы в качестве обоснования для применения конструктивных мероприятий (устройство охлаждающих систем) при проектировании дорог в аналогичных инженерно-геологических условиях на срок службы более 10 лет.

Список источников

1. Чжан Р.В., Петров А.Н. Геокриологическая безопасность линейных сооружений в условиях изменения климата // Криосфера Земли. 2023. Т. 27, № 4. С. 45–57.
2. Zhou J., Ma W., Mu Y. Long-Term Thermal Stability of Embankment in Permafrost Regions: A Numerical Study Using Coupled Heat Transfer and Phase Change Model // Cold Regions Science and Technology. 2022. Vol. 198. Pp. 103–115.
3. Королев М.В. Численное моделирование температурного режима автомобильных дорог в криолитозоне // Инженерная геология. 2024. № 1. С. 22–31.
4. COMSOL AB. Heat Transfer Module User's Guide. Version 6.2. Stockholm: COMSOL AB, 2023. 420 p.
5. Железняк М.Н., Булдович С.Н. Прогноз изменения геокриологических условий при освоении территорий Восточной Сибири. Новосибирск: Гео, 2021. 312 с.
6. Li S., Zhang H., Wang Y. Analysis of the Thermal Regime of Highway Embankment in Permafrost Regions Based on COMSOL Multiphysics // Proceedings of the International Conference on Cold Regions Engineering. ASCE, 2023. Pp. 134–145.
7. Стручков А.И., Спиридонов В.Б. Теплофизические свойства дисперсных грунтов Якутии // Вестник Северо-Восточного федерального университета. 2022. Т. 19, № 3. С. 55–63.
8. Mikhailov V., Syromyatina E. Numerical Analysis of the Influence of Climate Warming on the Stability of Road Embankments in Central Yakutia // Transportation Geotechnics. 2024. Vol. 45. Pp. 101–112.
9. Шестернев Д.М., Литовко А.В. Опыт проектирования и строительства на участке «Ледовый комплекс» Амуро-Якутской железнодорожной магистрали // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2017. Т. 22, № 2. С. 28–33.
10. Скрыбин П.Н. Динамика термического режима грунтов на трассах линейных сооружений Центральной Якутии // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2018. Т. 23, № 1. С. 48–53.

Дата поступления: 26.06.2026

Решение о публикации: 28.07.2026

Контактная информация:

ПЕТРЯЕВ Андрей Владимирович — доктор техн. наук; pgups60@mail.ru

СВЯТОГОРОВА Анастасия Владимировна — аспирант, ассистент кафедры «Строительство дорог транспортного комплекса»; svyatogorova@pgups.ru

МЯКИ Михаил Сергеевич — студент; myaki_ss@mail.ru

Analysis of Temperature Regime Changes in an Embankment within the Permafrost Zone of Yakutia (Based on Numerical Modeling in COMSOL Multiphysics)

A. V. Petryaev, A. V. Svyatogorova, M. S. Myaki

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

For citation: Petryaev A. V., Svyatogorova A. V., Myaki M. S. Analysis of Temperature Regime Changes in an Embankment within the Permafrost Zone of Yakutia (Based on Numerical Modeling in COMSOL Multiphysics) // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 3, pp. 34–44. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-34-44 (In Russian)

Abstract

The article presents the results of numerical modeling of the thermal regime of a railway embankment located in Central Yakutia (a region with a sharply continental climate and widespread permafrost). **Objective:** to perform a numerical analysis of the temperature regime changes in a railway embankment and its multi-layered foundation, situated in the continuous permafrost zone of Central Yakutia, considering “water-ice” phase transitions and seasonal fluctuations of climatic factors. **Methods:** the study employs the finite element method for modeling non-stationary heat transfer processes within the COMSOL Multiphysics software package. **Results:** the modeling established characteristic features of temperature distribution within the embankment body and foundation during winter and summer. **Practical significance:** the obtained data can be utilized in the design of linear structures (railways and highways) in permafrost zones to justify the necessity of employing structural mitigation measures.

Keywords: permafrost, cryolithozone, numerical modeling, seasonal thawing, railways

References

1. Zhang R. V., Petrov A. N. Geokriologicheskaya bezopasnost' linejnykh sooruzhenij v usloviyakh izmeneniya klimata [Geocryological Safety of Linear Structures under Climate Change], *Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]*, 2023, vol. 27, no. 4, pp. 45–57. (In Russian)
2. Zhou J., Ma W., Mu Y. Long-Term Thermal Stability of Embankment in Permafrost Regions: A Numerical Study Using Coupled Heat Transfer and Phase Change Model, *Cold Regions Science and Technology*, 2022, vol. 198, pp. 103–115.
3. Korolev M. V. Chislennoe modelirovanie temperaturnogo rezhima avtomobilnykh dorog v kriolitozone [Numerical Simulation of the Temperature Regime of Highways in the Cryolithozone], *Inzhenernaya geologiya [Engineering Geology]*, 2024, no. 1, pp. 22–31. (In Russian)
4. COMSOL AB. Heat Transfer Module User's Guide, version 6.2, Stockholm, COMSOL AB, 2023, 420 p.
5. Zheleznyak M. N., Buldovich S. N. Prognoz izmeneniya geokriologicheskikh uslovij pri osvoenii territorij Vostochnoj Sibiri [Forecast of Changes in Geocryological Conditions during the Development of Territories in Eastern Siberia], Novosibirsk, Geo, 2021, 312 p. (In Russian)
6. Li S., Zhang H., Wang Y. Analysis of the Thermal Regime of Highway Embankment in Permafrost Regions Based on COMSOL Multiphysics, *Proceedings of the International Conference on Cold Regions Engineering*, ASCE, 2023, pp. 134–145.

7. Struchkov A. I., Spiridonov V. B. Teplofizicheskie svoystva dispersnykh gruntov Yakutii [Thermophysical Properties of Dispersed Soils in Yakutia], *Vestnik Severo-Vostochnogo federalnogo universiteta [Bulletin of the North-Eastern Federal University]*, 2022, vol. 19, no. 3, pp. 55–63. (In Russian)
8. Mikhajlov V., Syromyatina E. Numerical Analysis of the Influence of Climate Warming on the Stability of Road Embankments in Central Yakutia, *Transportation Geotechnics*, 2024, vol. 45, pp. 101–112.
9. Shesternev D. M., Litovko A. V. Opyt proektirovaniya i stroitel'stva na uchastke “Ledovyj kompleks” Amuro-Yakutskoj zheleznodorozhnoj magistrali [Experience in Design and Construction at the “Ice Complex” Section of the Amur-Yakutsk Railway], *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki [Natural Resources of the Arctic and Subarctic]*, 2017, vol. 22, no. 2, pp. 28–33. (In Russian)
10. Skryabin P. N. Dinamika termicheskogo rezhima gruntov na trassakh linejnykh sooruzhenij Tsentral'noj Yakutii [Dynamics of the Thermal Regime of Soils along Linear Structures in Central Yakutia], *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki [Natural Resources of the Arctic and Subarctic]*, 2018, vol. 23, no. 1, pp. 48–53. (In Russian)

Received: June 26, 2026

Accepted: July 28, 2026

Author's information:

Andrej V. PETRYAEV — Dr. Sci. in Engineering; pgups60@mail.ru

Anastasiya V. SVYATOGOROVA — Postgraduate Student, Assistant of the “Road Construction of the transport complex” Department; svyatogorova@pgups.ru

Mikhail S. MYAKI — Student; myaki_ss@mail.ru

УДК 625.12

Обеспечение устойчивости земляного полотна в районах распространения многолетнемерзлых грунтов на примере Амурской области

И. В. Колос, А. В. Святогорова, М. С. Мяки, К. Р. Никифоров

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

Для цитирования: Колос И. В., Святогорова А. В., Мяки М. С., Никифоров К. Р. Обеспечение устойчивости земляного полотна в районах распространения многолетнемерзлых грунтов на примере Амурской области // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 3. С. 45–58. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-45-58

Аннотация

В статье рассмотрены инженерно-геокриологические условия Амурской области. Проведен сравнительный анализ эффективности двух конструктивных решений для обеспечения устойчивости насыпей в криолитозоне: каменной наброски и свайных фундаментов. Оценка устойчивости выполнена методом круглоцилиндрических поверхностей скольжения в GEO5. **Цель:** провести сравнительную оценку эффективности каменной наброски и свайных фундаментов для обеспечения устойчивости земляного полотна в районах распространения многолетнемерзлых грунтов Амурской области. **Методы:** оценка устойчивости откосов насыпи методом Шахунянца (круглоцилиндрические поверхности скольжения) в программе GEO5. Расчет выполнен для двух вариантов укрепления: каменной наброски и свайного поля (длина 5 м, шаг 2,5 м). **Результаты:** коэффициент запаса устойчивости для каменной наброски составил 2,53, для свайного поля — 2,41. Оба значения превышают нормативные требования (1,15–1,30). Глубина сезонного промерзания в регионе достигает 2,0–2,5 м. **Практическая значимость:** результаты могут применяться при проектировании дорог на участках БАМа. Выбор решения рекомендуется определять технико-экономическим сравнением с учетом местных условий.

Ключевые слова: многолетнемерзлые грунты, Амурская область, устойчивость земляного полотна, каменная наброска, свайные фундаменты, Байкало-Амурская магистраль

Введение

Обеспечение устойчивости земляного полотна железных дорог является одной из наиболее сложных инженерных задач в современном транспортном и инфраструктурном строительстве. Территория Амурской области, через которую проходят ключевые артерии страны, включая Байкало-Амурскую магистраль, характеризуется широким распространением многолетнемерзлых грунтов и сезонно-талых слоев.

Главная проблема заключается в высокой чувствительности мерзлых грунтов к техногенному воздействию и изменению климата. Существующие нормативные подходы не всегда учитывают динамику оттаивания. В связи с этим особую актуальность приобретают анализ и сравнительная оценка эффективности различных конструктивных решений, направленных на сохранение мерзлоты (таких

как свайные поля, каменная наброска и т. д.). Расчет их стабильности и несущей способности позволяет не только предотвратить аварийные ситуации, но и оптимизировать затраты на строительство и эксплуатацию объектов.

В научной литературе вопросы оценки устойчивости земляного полотна в районах распространения многолетнемерзлых грунтов традиционно рассматриваются с позиций совместного учета напряженно-деформированного состояния и теплового взаимодействия конструкции с мерзлой толщей. Основополагающие подходы к расчету устойчивости откосов методом круглоцилиндрических поверхностей скольжения были разработаны Г. М. Шахунянцем [1], чей метод впоследствии был адаптирован для условий вечной мерзлоты.

Дальнейшее развитие данное направление получило в трудах В. Ф. Жукова, Г. И. Лапшина и Е. С. Ашпиза [2], предложивших методики учета оттаивания грунтов основания при определении устойчивости насыпей. Значительный вклад в разработку нормативной базы внесли коллективы СоюзДорНИИ и СибАДИ, результаты которых нашли отражение в ВСН 84–89 [3] и актуализированных сводах правил.

Описание района исследования

Территория Амурской области составляет 361,9 тыс. км², что занимает 2,12% площади России. Область граничит с Якутией, Хабаровским краем, Еврейской автономной областью, Забайкальским краем, а также с Китаем на юго-западе. Расположение области показано на рис. 1.

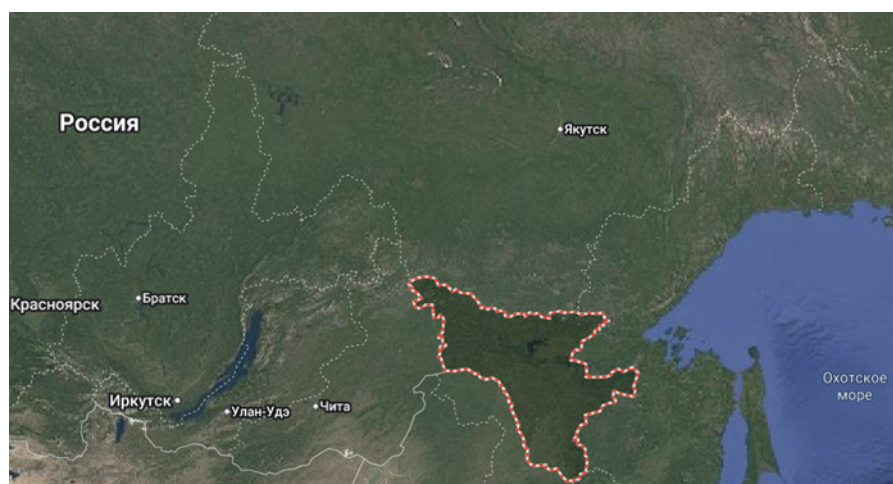


Рис. 1. Амурская область

Грунты Амурской области отличаются разнообразием в зависимости от рельефа. На равнинах преобладают суглинистые и глинистые грунты мощностью 10–20 м, местами встречаются илистые грунты. В холмистой и низкогорной местности распространены щебеночно-суглинистые грунты. В долинах рек залегают аллювиальные отложения (галечники, пески, суглинки). Для территории также

характерны буротаежные, болотные, лугово-черноземовидные почвы и техногенные грунты в районах золотодобычи. Глубина промерзания грунтов достигает 2–2,5 м [4]. Средняя глубина промерзания грунтов в Амурской области представлена на рис. 2.

Многолетнемерзлые грунты распространены в северной и центральной частях Амурской области. Мерзлота здесь выделяется в виде островов и линз, занимая 60 % площади территории региона. Мощность на равнинах составляет примерно 70–80 м, в горных районах (Каларский, Становой хребты) — до 200–500 м. Среднегодовая температура мерзлых пород обычно от $-0,5$ до -2 °С.

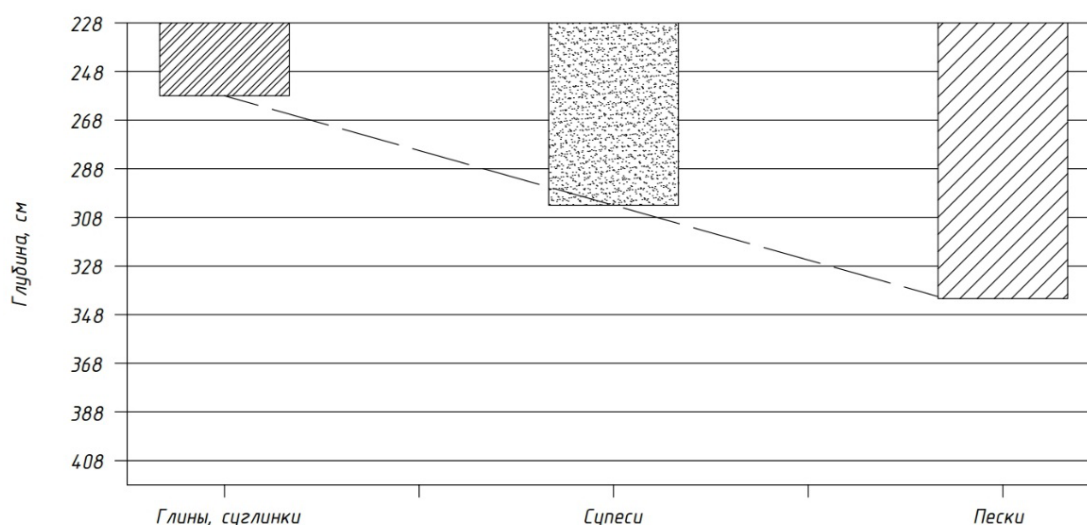


Рис. 2. Средняя глубина промерзания грунтов

Среднемесячные температура и влажность воздуха представлены на рис. 3.

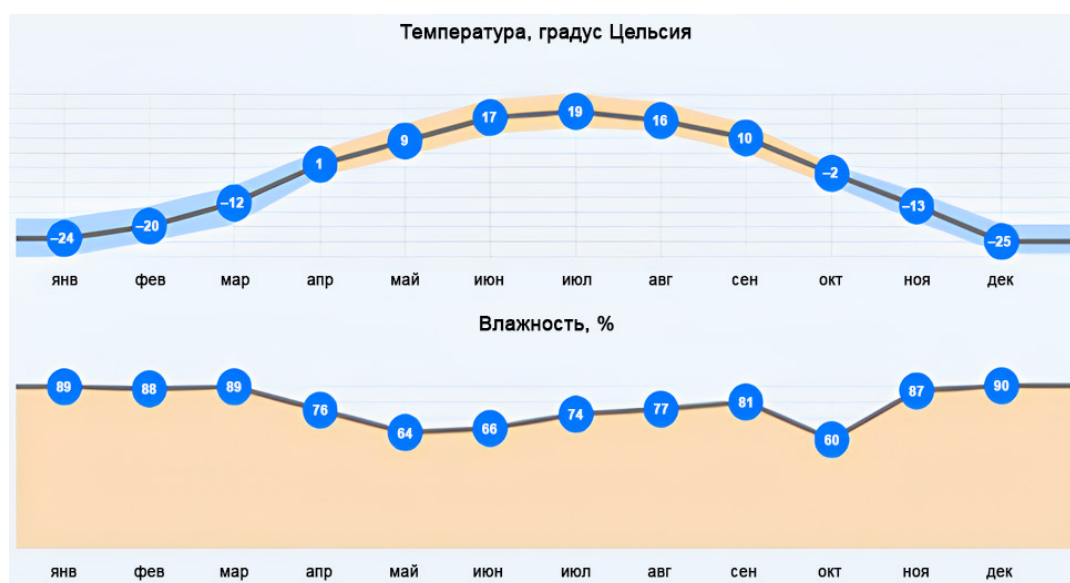


Рис. 3. Среднемесячные температура и влажность

Деформации земляного полотна происходят из-за сезонного промерзания и оттаивания, когда грунты вспучиваются зимой и проседают весной, а также из-за деградации мерзлоты, которая при оттаивании резко теряет несущую способность. Оттаивание грунта под нагрузкой всегда сопровождается сложными процессами: взаимными смещениями твердых частиц, сжатием воды и воздуха в порах грунта и вытеснением свободной воды из пор грунта. Другими словами, при оттаивании и нагрузке объем мерзлого грунта уменьшается, что приводит к проседанию. Причина в том, что часть льда или весь лед превращается в воду, частицы грунта уплотняются, а пустоты в грунте сокращаются. Деформация талых грунтов вызвана сочетанием теплофизических, механических и физико-химических изменений. По мере таяния грунта содержание льда в нем и прочность сцепления между частицами грунта и льдом уменьшаются. В результате способность грунта сопротивляться деформации снижается, и при внешней нагрузке возникают большие деформации [5]. Эти факторы создают сложные условия для железнодорожного строительства в регионе. Пример деформации земляного полотна представлен на рис. 4.



Рис. 4. Деформация земляного полотна (просадка). Фото А. В. Святогоровой

Конструктивные решения для обеспечения стабильности земляного полотна в районах распространения многолетнемерзлых грунтов

Представленные в предыдущем разделе данные температурного мониторинга наглядно демонстрируют наличие деятельного слоя и чувствительность многолетнемерзлой толщи к тепловому воздействию. Для минимизации этого воздействия и обеспечения проектной несущей способности оснований применяются специализированные конструктивные решения. Их ключевая задача — исключить оттаивание грунта. В практике строительства Амурской области, особенно на объектах БАМа, наибольшее распространение получили два подхода: устройство свайных фундаментов и укрепление откосов каменной наброской.

Сваи передают нагрузку на глубокие слои мерзлого грунта, минуя нестабильные верхние. В условиях вечной мерзлоты применяются следующие виды:

1. *Винтовые сваи.* Металлическая труба с анкером и лопастями обеспечивает простое погружение без нарушения структуры грунта. Обладают высокой несущей способностью, но не подходят для скальных грунтов и пород с известняком.

2. *Бетонные наливные сваи.* В высверленные в мерзлоте отверстия опускают армокаркас и заливают бетон с противоморозными присадками. Используются марки бетона, устойчивые к низким температурам и влаге. Конструкция представлена на рис. 5.



Рис. 5. Бетонные наливные сваи. Фото А. В. Святогоровой

3. *Буроопускные сваи.* Погружаются в скважины с грунтовым раствором (диаметр на 5 см больше сечения сваи). Применяются в твердомерзлых (ниже $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) и пластичномерзлых (до $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) грунтах [6]. Конструкция представлена на рис. 6.



Рис. 6. Буроопускные сваи. Фото: <https://бетонолитные-трубы.рф/>

Каменная наброска — крупнообломочный слой из камней размером 200–500 мм, укладываемый на откосах, — выполняет функцию своеобразной термостабилизирующей «шубы», но с охлаждающим эффектом. Принцип ее работы основан на естественной конвекции воздуха: зимой холодный воздух, будучи тяжелее, опускается в пустоты между камнями, вытесняя более теплый и обеспечивая глубокое промораживание тела насыпи. Летом каменная наброска работает как тепловой экран: светлая поверхность отражает солнечные лучи, а низкая теплопроводность камней предотвращает прогрев грунта.

Такая конструкция позволяет сохранять многолетнемерзлое состояние грунтов основания, не давая им оттаивать и терять несущую способность. Это особенно актуально для участков, где вечная мерзлота находится в неустойчивом, пластичном состоянии.

Именно это технологическое решение активно применяется при модернизации Байкало-Амурской магистрали, в частности на сложных участках Тынды — Хани и Тынды — Бамовская, где инженерно-мерзлотные условия традиционно создают высокие риски для стабильности земляного полотна [7]. Конструкция представлена на рис. 7.



Рис. 7. Охлаждающая каменная наброска. Фото: <https://bsmuk.ru/>

Моделирование устойчивости конструкций

Для описанных ранее конструкций был проведен сравнительный анализ эффективности их применения для стабилизации откоса. В качестве объекта исследования рассматривалась насыпь из суглинка высотой до 3 м. Оценка устойчивости выполнялась расчетным методом Шахунянца, который широко применяется для анализа устойчивости откосов и склонов, сложенных однородными грунтами.

Расчет был произведен по формуле (1), полученной для круглоцилиндрической поверхности:

$$k = \frac{\sum P_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i + \sum c_i s_i}{\sum P_i \cos \alpha_i + \sum Q_{ci}}. \quad (1)$$

Суть метода заключается в определении коэффициента запаса устойчивости как отношения моментов удерживающих сил к моменту сдвигающих сил относительно центра предполагаемой кривой скольжения. Этот подход позволяет достаточно надежно оценить напряженно-деформированное состояние грунтового массива при заданных геометрических параметрах и физико-механических характеристиках грунта.

Моделирование поведения предложенных конструкций земляного полотна было проведено с использованием программного комплекса GEO5. Исходные данные приведены в таблице. Расчетная схема и результаты моделирования представлены на рис. 8–12.

ТАБЛИЦА. Исходные данные для расчета

Вид конструкции	Характеристики
Грунт насыпи: супесь	Удельный вес = 18,0 кН/м ³ Коэффициент Пуассона = 0,32 Тип $E_{\text{эл}}$ — постоянное Одометрический модуль $E_{\text{оed}} = 25,0$ МПа Удельный вес водонасыщенного грунта = 19,5 кН/м ³
Сваи	Длина = 5 м Шаг свай = 2,5 м Сечение = 0,35 м Мах несущая способность $V_u = 100$ кН Количество — 16 штук
Насыпь 1: защитный слой (асфальт)	Удельный вес = 24,0 кН/м ³ Коэффициент Пуассона = 0,3 Тип $E_{\text{эл}}$ — постоянное Одометрический модуль $E_{\text{оed}} = 2000,0$ МПа Удельный вес водонасыщенного грунта = 24,0 кН/м ³
Насыпь 1: защитный слой (ЩПГС)	Удельный вес = 21,0 кН/м ³ Коэффициент Пуассона = 0,27 Тип $E_{\text{эл}}$ — постоянное Одометрический модуль $E_{\text{оed}} = 50,0$ МПа Удельный вес водонасыщенного грунта = 23,0 кН/м ³
Грунт основания: глина тугопластичная	Удельный вес = 19,0 кН/м ³ Коэффициент Пуассона = 0,42 Тип $E_{\text{эл}}$ — постоянное Одометрический модуль $E_{\text{оed}} = 16,5$ МПа Удельный вес водонасыщенного грунта = 20,0 кН/м ³
Грунт основания: суглинок	Удельный вес = 19,0 кН/м ³ Коэффициент Пуассона = 0,35 Тип $E_{\text{эл}}$ — постоянное Одометрический модуль $E_{\text{оed}} = 20,0$ МПа Удельный вес водонасыщенного грунта = 20,0 кН/м ³
Грунт основания: песок	Удельный вес = 18,5 кН/м ³ Коэффициент Пуассона = 0,30 Тип $E_{\text{эл}}$ — постоянное Одометрический модуль $E_{\text{оed}} = 40,0$ МПа Удельный вес водонасыщенного грунта = 20,0 кН/м ³
Каменная наброска	Удельный вес = 19,0 кН/м ³ Коэффициент Пуассона = 0,27 Тип $E_{\text{эл}}$ — постоянное Одометрический модуль $E_{\text{оed}} = 70,0$ МПа Удельный вес водонасыщенного грунта = 20,5 кН/м ³

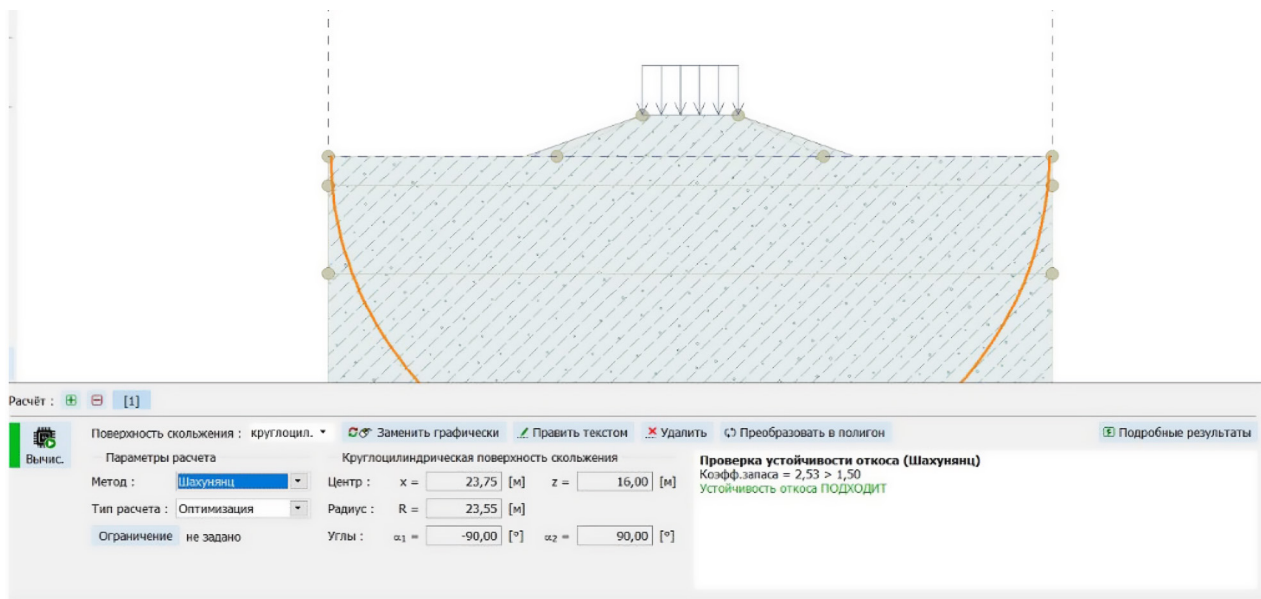


Рис. 8. Результат расчета стабильности откоса при устройстве каменной наброски

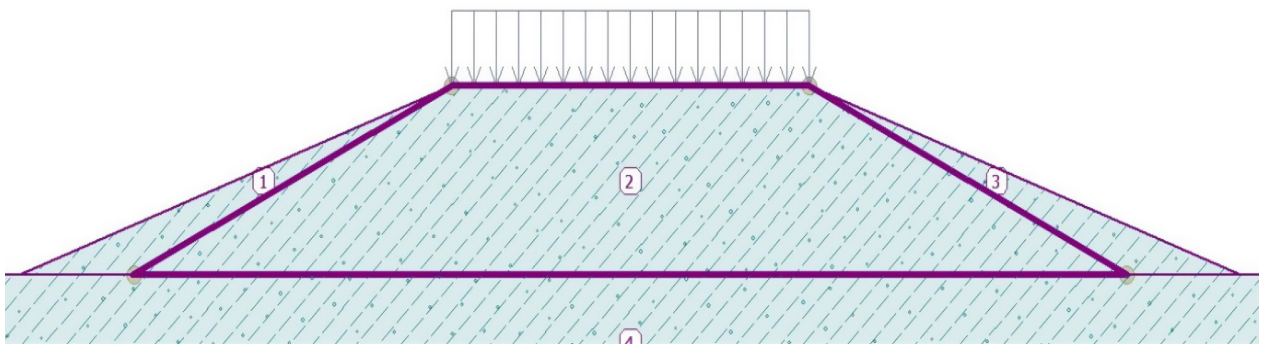


Рис. 9. Схема насыпи с устройством каменной наброски

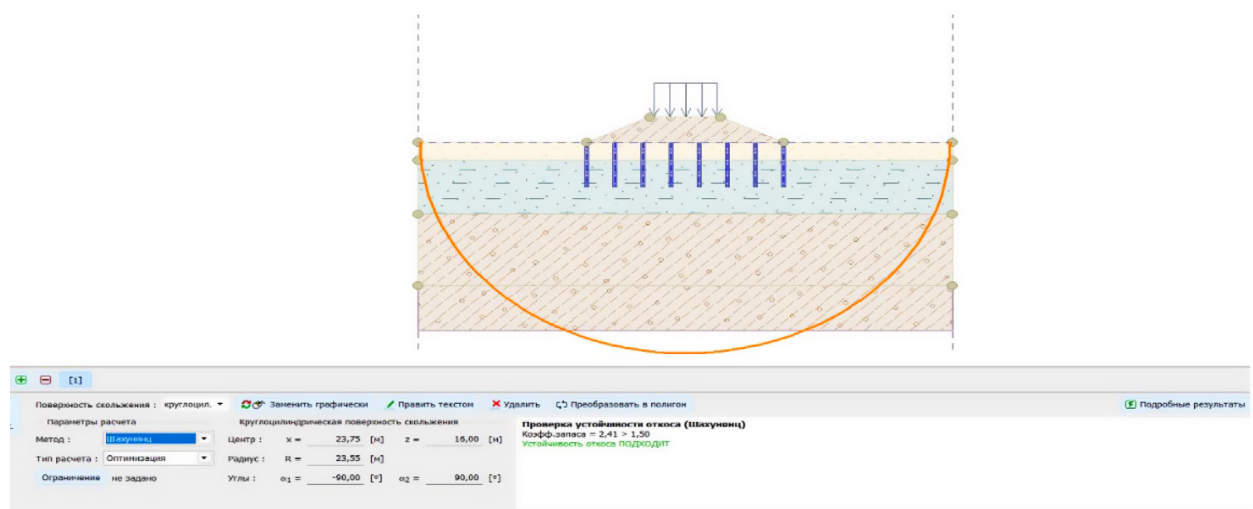


Рис. 10. Визуализация железнодорожной насыпи с каменной наброской при действии статической нагрузки

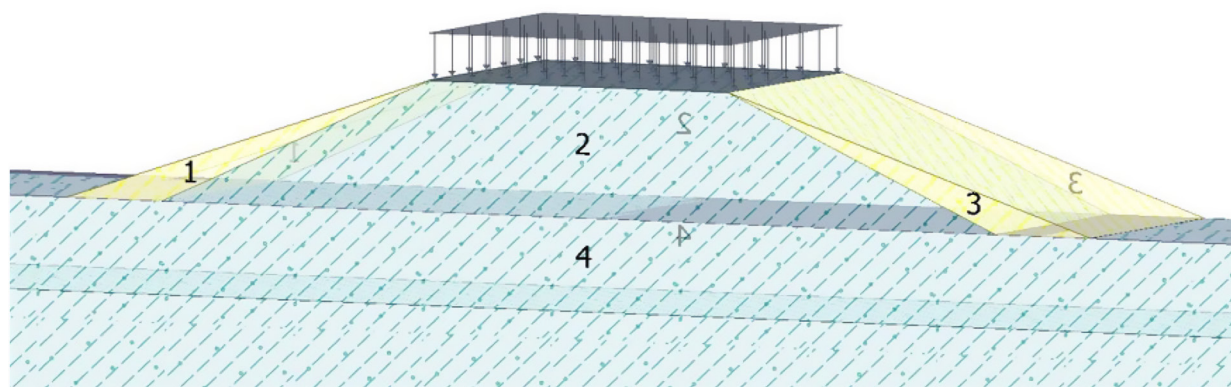


Рис. 11. Результат расчета стабильности откоса при устройстве свайного куста

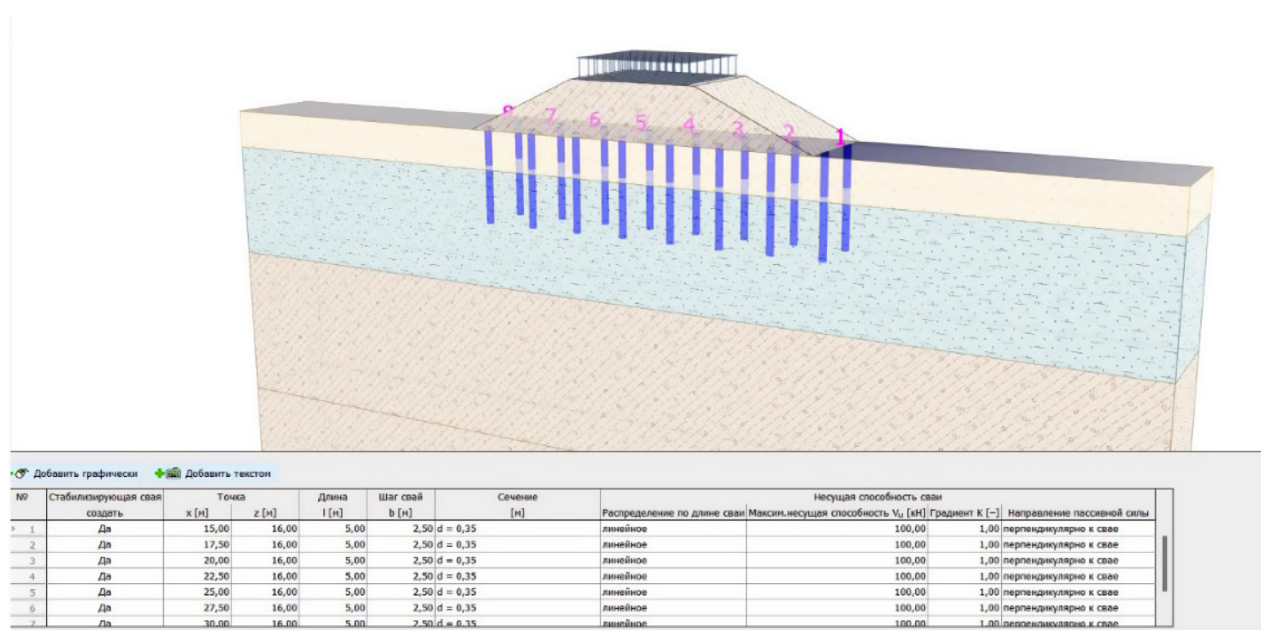


Рис. 12. Визуализация насыпи со свайным кустом при действии статической нагрузки

Результаты моделирования

Для варианта с каменной наброской коэффициент запаса устойчивости составил 2,53. Это высокое значение свидетельствует о значительном запасе прочности. Каменная наброска работает как гравитационная конструкция, своим весом противодействуя сдвигающим усилиям. Полученный коэффициент значительно превышает нормативные требования (обычно 1,15–1,30), что говорит о надежности конструкции, но также может указывать на потенциальную возможность ее оптимизации для снижения материалоемкости. Результаты расчета представлены на рис. 8–10.

Для варианта со свайным основанием, где использовались сваи длиной 5 м с шагом 2,5 м, коэффициент запаса устойчивости составил 2,41. Сваи работают

как удерживающие элементы, пересекающие поверхность скольжения и воспринимающие сдвигающие нагрузки. Полученное значение также является высоким и подтверждает эффективность свайного ряда в повышении устойчивости откоса. Несмотря на немного меньший коэффициент по сравнению с наброской, свайное решение может быть более предпочтительным с точки зрения долговечности и менее агрессивного воздействия на окружающую среду. Результаты расчета представлены на рис. 11–12.

Выводы

Анализ природных условий показал, что территория характеризуется наличием сезонно-талых и многолетнемерзлых грунтов, а глубина сезонного промерзания достигает 2–2,5 м, что требует обязательного учета при проектировании.

Были рассмотрены основные типы конструкций, применяемые на участках БАМ в Амурской области: свайные фундаменты (винтовые, буроналивные, буропускные), передающие нагрузку на глубокие мерзлые слои, и каменная наброска на откосах, обеспечивающая естественное охлаждение грунта.

Выполненный сравнительный расчет устойчивости насыпи методом Шахунянца показал, что коэффициент устойчивости при использовании охлаждающей каменной наброски составил 2,53, для свайного поля — 2,41, что значительно превышает нормативные требования (1,15–1,30) и подтверждает надежность обоих решений.

Таким образом, оба рассмотренных конструктивных решения эффективны для обеспечения стабильности земляного полотна в криолитозоне. Выбор конкретного варианта должен определяться технико-экономическим сравнением с учетом условий эксплуатации и доступности материалов. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и реконструкции дорог в районах распространения многолетнемерзлых грунтов.

Список источников

1. Шахунянец Г. М. Земляное полотно железных дорог. М.: Трансжелдориздат, 1953.
2. Ашпиз Е. С. Проектирование железнодорожного пути и земляного полотна на слабых грунтах. М.: МИИТ, 2012.
3. ВСН 84-89. Изыскания, проектирование и строительство автомобильных дорог в районах распространения вечной мерзлоты. М.: СоюзДорНИИ, 1989.
4. Амурская область // Wikipedia. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Амурская_область
5. Experimental Study on Dynamic Elastic Modulus of Thawing Subgrade Sandy Loam Soil Under Vibration Load / W.S. Xin [et al.] // Cold Regions Science and Technology. 2025. No. 241. Art. 104688.
6. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах // Нормативные базы ГОСТ/СП/СНиП. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294854/4294854682.pdf>

7. «Бамстроймеханизация» защищает от жары вечную мерзлоту под БАМом // Группа компаний 1520. URL: <https://bam.1520.ru/press-center/news/bamstroymekhanizatsiya-zashchishchaet-ot-zhary-vechnuyu-merzlotu-pod-bamom-novosti/>
8. Проблемы единого взаимодействия инфраструктуры различных видов железнодорожного транспорта при развитии сети железных дорог в Арктической зоне / С. В. Шкурников [и др.] // Инфраструктура транспорта. 2022. № 1 (3). С. 96–102.
9. Prediction of Thermal Regime and Frost Heave Deformation of Subgrade Soil During Non-Stationary Heat and Moisture Transfer / X. Wang [et al.] // Transportation Geotechnics. 2024. Т. 48. Art. 101338. DOI: 10.1016/j.trgeo.2024.101338
10. СП 25.13330.2020. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88 (с изменениями № 1, № 2). М.: Минстрой России, 2020. 157 с.
11. Оценка современных изменений геокриологических условий на трассе Байкало-Амурской магистрали / Д. А. Стрелецкий [и др.] // Криосфера Земли. 2023. Т. 27, № 2. С. 3–14.

Дата поступления: 21.06.2026

Решение о публикации: 28.07.2026

Контактная информация:

КОЛОС Ирина Владимировна — кандидат техн. наук, доцент кафедры «Строительство дорог транспортного комплекса»; irina_kolos70@bk.ru

СВЯТОГОРОВА Анастасия Владимировна — аспирант, ассистент кафедры «Строительство дорог транспортного комплекса»; svyatogorova@pgups.ru

МЯКИ Михаил Сергеевич — студент; myaki_ss@mail.ru

НИКИФОРОВ Кирилл Романович — студент; dfs1233@mail.ru

Ensuring the Stability of Subgrade in Permafrost Areas Using the Example of Amur Oblast

I. V. Kolos, A. V. Svyatogorova, M. S. Myaki, K. R. Nikiforov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

For citation: Kolos I. V., Svyatogorova A. V., Myaki M. S., Nikiforov K. R. Ensuring the Stability of Subgrade in Permafrost Areas Using the Example of Amur Oblast // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 3, pp. 45–58. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-45-58 (In Russian)

Abstract

The article examines the engineering-geocryological conditions of Amur Oblast. A comparative analysis of the effectiveness of two structural solutions for ensuring the stability of embankments in the permafrost zone is conducted: rock riprap and pile foundations. Stability assessment is performed using the method of circular

cylindrical slip surfaces in GEO5. **Objective:** to conduct a comparative assessment of the effectiveness of rock riprap and pile foundations for ensuring subgrade stability in permafrost areas of Amur Oblast. **Methods:** assessment of embankment slope stability using the Shakhunyants method (circular cylindrical slip surfaces) in the GEO5 software. Calculations were performed for two reinforcement options: rock riprap and pile field (length 5 m, spacing 2.5 m). **Results:** the factor of safety for rock riprap was 2.53, and for the pile field — 2.41. Both values exceed regulatory requirements (1.15–1.30). The seasonal freezing depth in the region reaches 2.0–2.5 m. **Practical significance:** the results can be applied in the design of roads on sections of the Baikal-Amur Mainline. The choice of solution is recommended to be determined by technical and economic comparison considering local conditions.

Keywords: permafrost, Amur Oblast, subgrade stability, rock riprap, pile foundations, Baikal-Amur Mainline

References

1. Shakhunyants G.M. *Zemlyanoe polотно zheleznnykh dorog* [Subgrade of Railways], Moscow, Transzheldorizdat [Transport Railway Publishing House], 1953. (In Russian)
2. Ashpiz E.S. *Proektirovanie zheleznodorozhnogo puti i zemlyanogo polotna na slabnykh gruntakh* [Design of Railway Track and Subgrade on Weak Soils], Moscow, MIIT [Moscow State University of Railway Engineering], 2012. (In Russian)
3. VSN 84-89. *Izyskaniya, proektirovanie i stroitelstvo avtomobilnykh dorog v rayonakh rasprostraneniya vечноy merzloty* [Surveys, Design and Construction of Highways in Permafrost Areas], Moscow, Soyuzdornii [All Union Research Institute of Roads], 1989. (In Russian)
4. Amurskaya oblast [Amur Oblast], Wikipedia. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Амурская_область (In Russian)
5. Xin W.S., et al. Experimental Study on Dynamic Elastic Modulus of Thawing Subgrade Sandy Loam Soil Under Vibration Load, *Cold Regions Science and Technology*, 2025, no. 241, art. 104688.
6. SNiP 2.02.04-88. *Osnovaniya i fundamenty na vечноmerzlykh gruntakh* [Foundations and Footings on Permafrost Soils], Normativnye bazy GOST/SP/SNiP [Normative Bases GOST/SP/SNiP]. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294854/4294854682.pdf> (In Russian)
7. “Bamstroymekhanizatsiya” zashchishchaet ot zhary vечноy merzloty pod BAMom [“Bamstroymekhanizatsiya” Protects Permafrost under the BAM from Heat], Gruppa kompanij 1520 [Group of Companies 1520]. URL: <https://bam.1520.ru/press-center/news/bamstroymekhanizatsiya-zashchishchaet-ot-zhary-vechnoy-merzloty-pod-bamom-novosti/>
8. Shkurnikov S. V., et al. Problemy edinogo vzaimodejstviya infrastruktury razlichnykh vidov zheleznodorozhnogo transporta pri razvitii seti zheleznnykh dorog v Arkticheskoy zone [Problems of Unified Interaction of Infrastructure of Different Types of Railway Transport in the Development of the Railway Network in the Arctic Zone], *Infrastruktura transporta* [Transport Infrastructure], 2022, no. 1 (3), pp. 96–102. (In Russian)
9. Wang X., et al. Prediction of Thermal Regime and Frost Heave Deformation of Subgrade Soil During Non Stationary Heat and Moisture Transfer, *Transportation Geotechnics*, 2024, vol. 48, art. 101338. DOI: 10.1016/j.trgeo.2024.101338

10. SP 25.13330.2020. Svod pravil. Osnovaniya i fundamenty na vechnomerzlykh gruntakh. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.02.04-88, s izmeneniyami № 1, 2 [Code of Practice. Foundations and Footings on Permafrost Soils. Updated version of SNiP 2.02.04-88, with amendments no. 1, 2], Moscow, Minstroy Rossii [Ministry of Construction of the Russian Federation], 2020, 157 p. (In Russian)

11. Streleckij D. A., et al. Ocenka sovremennyh izmenenij geokriologicheskikh uslovij na trasse Bajkalo-Amurskoj magistrali [Assessment of Current Changes in Geocryological Conditions along the Baikal-Amur Mainline], *Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]*, 2023, vol. 27, no. 2, pp. 3–14. (In Russian)

Received: June 21, 2026

Accepted: July 28, 2026

Author's information:

Irina V. KOLOS — PhD in Engineering, Associate Professor of the “Road Construction of the Transport Complex” Department; irina_kolos70@bk.ru

Anastasiya V. SVYATOGOROVA — Postgraduate Student, Assistant of the “Road Construction of the Transport Complex” Department; svyatogorova@pgups.ru

Mikhail S. MYAKI — Student; myaki_ss@mail.ru

Kirill R. NIKIFOROV — Student; dfs1233@mail.ru

УДК 625.14

Оценка влияния подбалластных матов на снижение вибрации

Н. К. Маслов, А. В. Петряев, А. А. Сайдалиев

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

Для цитирования: Маслов Н. К., Петряев А. В., Сайдалиев А. А. Оценка влияния подбалластных матов на снижение вибрации // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 3. С. 59–77. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-59-77

Аннотация

Цель: разработка и обоснование расчетно-экспериментального подхода к оценке влияния подбалластных матов на снижение вибрации в конструкции верхнего строения пути на железнодорожных линиях, обеспечивающего переход от лабораторно определяемых характеристик упругого материала к расчету передаточной способности, вносимых потерь, динамической жесткости и механического импеданса системы «верхнее строение пути — подбалластный мат — основание». **Методы:** исследование существующих вязкоупругих моделей, методов оценки виброизоляции и требований стандартов DIN 45673, ISO 10846 и EN 17282. Рассмотрены типовая и виброизоляционная механические модели верхнего строения пути, методы расчета комплексной динамической жесткости, передаточной функции и вносимых потерь в частотной области. Для экспериментальной оценки предложен косвенный метод испытаний на вибростенде с гармоническим возбуждением, статическим предварительным нагружением и регистрацией амплитуд перемещений опорной плиты и нагрузочной массы. Метод основан на модели с одной степенью свободы, позволяющей по резонансной частоте и ширине резонансного пика определять эквивалентную динамическую жесткость, коэффициент демпфирования и модуль механического импеданса. Для возможного прогнозирования вибрационного воздействия предложен аналитический импедансный подход, учитывающий соотношение динамических сопротивлений пути, мата и основания. **Результаты:** установлено, что виброизоляционная эффективность подбалластного мата определяется не только его динамической жесткостью и коэффициентом потерь, но и собственной частотой системы и соотношением импедансов элементов конструкции. Показано, что на частотах ниже собственной частоты возможно резонансное усиление колебаний, тогда как в средне- и высокочастотной областях подбалластный мат обеспечивает снижение передаваемой вибрации. В рассмотренном расчетном примере положительные вносимые потери получены при частотах свыше 33 Гц. Обоснована возможность определения эквивалентной динамической жесткости, коэффициента демпфирования и модуля механического импеданса по амплитудной частотной характеристике, полученной с помощью двух вибропреобразователей. Определено, что без измерения фазового сдвига или динамической силы невозможно корректно определить действительную и мнимую части комплексной жесткости и комплексного импеданса. **Практическая значимость:** предложенный подход позволяет использовать результаты лабораторных испытаний подбалластных матов для предварительного расчета вносимых потерь, определения рабочих диапазонов виброизоляции и сравнения материалов по динамической жесткости и демпфированию. Полученные эквивалентные характеристики могут использоваться как исходные данные для модели конечных элементов железнодорожного пути.

Ключевые слова: вибрация, подбалластные маты, вибродинамическое воздействие, вносимые потери, передаточная способность, комплексная динамическая жесткость, импеданс, демпфирование, вибростенд

Введение

Одной из ключевых проблем, возникающих при движении высокоскоростных пассажирских и грузовых поездов, является повышенное вибродинамическое воздействие, которое приводит к ускоренному износу верхнего строения пути и ухудшению эксплуатационных характеристик.

В связи с этим особую актуальность приобретают методы и технологии, направленные на эффективное снижение вибрационных нагрузок. Одним из них является использование упругих материалов, которые широко используются в качестве компонентов для подавления вибраций.

Такие материалы находят применение и на железнодорожных путях как подбалластные маты, которые способны улучшить виброизоляционные характеристики пути посредством снижения вибраций, вызванных движением поездов и передаваемых по грунту в окружающую среду [1–3].

Подбалластные маты относятся к наиболее распространенным упругим элементам железнодорожного пути, предназначенным для уменьшения передачи вибрации и для защиты балластного слоя от ускоренного разрушения. Обзорные работы показывают, что выбор мата всегда является компромиссом между виброизоляцией, допустимыми прогибами пути, долговечностью балласта и стоимостью жизненного цикла конструкции [4].

Перед внедрением эффективность виброизоляции оценивается с помощью методов прогнозирования. В этих методах механическое поведение упругих материалов часто представляется с использованием упрощенных вязкоупругих моделей. Примерами таких моделей являются модель Кельвина — Фойгта, где эластомерный элемент представлен упругой пружиной и вязким демпфером [5, 6].

Независимо от типа принимаемой модели связанные с ней механические параметры (значения жесткости и демпфирования) должны определяться экспериментальными измерениями.

Экспериментальные методы, используемые для характеристики динамических свойств упругих материалов, обычно основаны на определении частотных характеристик системы. В этом отношении обычно используется контролируемое динамическое возбуждение, например возбуждение с использованием вибростенда [7].

В настоящее время значительной проблемой является отсутствие отечественных стандартов, которые бы в полной мере определяли требования, методологию исследований и расчетов для упругих матов на железнодорожных путях. Ввиду неполноты данных регламентов методики исследования и расчета подбалластных матов обоснованным является использование зарубежных норм DIN 45673-1, DIN 45673-4, DIN 45673-5 и DIN 45673-7 [8–11].

Актуальной проблемой является усовершенствование методики расчета виброизоляционных свойств упругих материалов, которая бы показывала изменение демпфирующих характеристик в условиях динамической нагрузки верхнего строения пути с включением в подбалластный слой резиновых матов.

Вносимые потери и передаточная способность

В случае применения упругих матов в конструкции верхнего строения пути и земляного полотна вместо вязкого демпфирования используется модель гистерезисного демпфирования [12, 13]. Уравнение движения в случае системы с одной степенью свободы определяется из выражения:

$$m_{eff} \cdot \ddot{x}(t) + k(1 + i\eta) \cdot x(t) = F(t), \quad (1)$$

где F — сила, возбуждающая систему, Н;

m_{eff} — воздействующая динамическая масса, кг;

k — коэффициент упругости подбалластного материала, Н/м;

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

x — реакция системы, представленная смещением и дифференцируемая по времени, м.

Согласно [12], комплексный модуль жесткости определяется по формуле:

$$k^*(i\omega) = k(1 + i\eta) - m_{eff}\omega^2, \quad (2)$$

где ω — угловая частота возбуждения системы, рад/с.

В случае такой формулировки коэффициент потерь является постоянной величиной, не зависящей от частоты возбуждения. Следовательно, можно установить зависимость между коэффициентом потерь и коэффициентом демпфирования, согласно формуле:

$$c = \frac{\eta k}{\omega}, \quad (3)$$

где c — коэффициент вязкого демпфирования, Н·с/м.

Влияние упругих элементов на снижение вибрации, зависящее от частоты, количественно определяется величиной вносимых потерь в соответствии со стандартом DIN 45673-4 [9]. Вносимые потери характеризуют эффективность мер, направленных на снижение вибрации, что показывает, например, как изменяется уровень шума, создаваемого конструкцией, при установке подбалластных матов. В идеале все остальные факторы, влияющие на уровень шума, остаются неизменными, то есть учитываются один и тот же подвижной состав, одна и та же скорость, одинаковая неровность пути и т. д. В целом вносимые потери, зависящие от частоты, могут варьироваться в зависимости от других свойств верхнего строения пути, грунтов и параметров транспортного средства.

Согласно данным стандарта [9], рассмотрим две механические модели для расчета вносимых потерь, представляющие систему верхнего строения пути с включением подбалластных матов и без них (рис. 1).

Типовая система состоит из двух слоев. Параметры k_o и c_o представляют собой жесткость и демпфирование верхнего слоя системы (рельс, шпала, балласт), в то время как k_u и c_u определяют нижний слой системы (земляное полотно). В случае виброизоляционной системы рассматривается дополнительный слой, представляющий собой подбалластный мат и характеризующийся параметрами k_{el} и c_{el} .

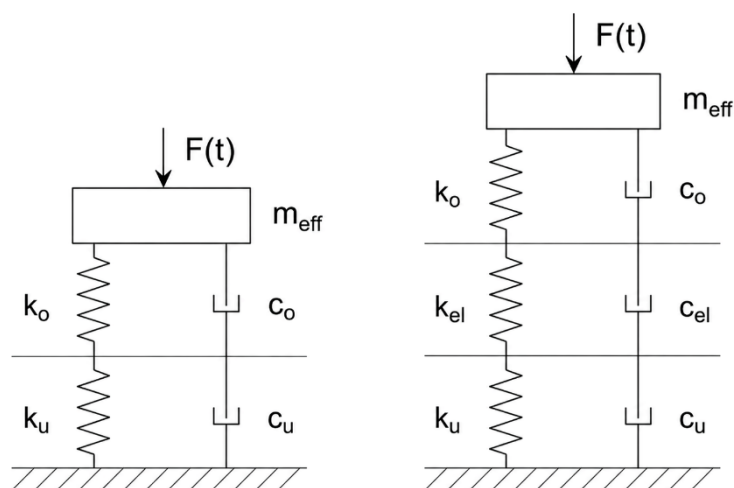


Рис. 1. Механическая модель системы ВСП:
типовая (слева) и виброизоляционная (справа)

На основании формул (1–3), а также исследований [5] комплексная жесткость типовой системы (нижний и верхний слой без учета массы) определяется по формуле:

$$k_{ref}^*(i\omega) = \left[\frac{1}{k_o + i\omega c_o} + \frac{1}{k_u + i\omega c_u} \right]^{-1}. \quad (4)$$

Комплексная жесткость виброизоляционной системы вычисляется по формуле:

$$k_{vib}^*(i\omega) = \left[\frac{1}{k_{ref}^*(i\omega)} + \frac{1}{k_{el} + i\omega c_{el}} \right]^{-1}. \quad (5)$$

Таким образом, комплексная передаточная функция для типовой и виброизоляционной систем определяется по формулам (6) и (7) соответственно:

$$H_{ref}^*(i\omega) = \frac{k_{ref}^*(i\omega)}{k_{ref}^*(i\omega) - m_{eff}\omega^2}, \quad (6)$$

$$H_{vib}^*(i\omega) = \frac{k_{vib}^*(i\omega)}{k_{vib}^*(i\omega) - m_{eff}\omega^2}. \quad (7)$$

Абсолютное значение комплексной передаточной функции представляет собой модуль частотной характеристики системы и характеризует отношение амплитуды выходного сигнала к амплитуде входного при гармоническом воздействии заданной частоты [14].

Физически модуль передаточной функции может интерпретироваться как передаточная способность системы на данной частоте, то есть мера эффективности передачи колебательной энергии, перемещений или других параметров от входа к выходу. Значения $|H(i\omega)| > 1$ соответствуют усилению передачи сигнала, $|H(i\omega)| < 1$ — ослаблению. Численно передаточную способность можно представить формулой:

$$|H(i\omega)| = T(\omega) = \frac{\sqrt{1 + \eta^2 \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right)^2 + \eta^2 \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}}, \quad (8)$$

где f — частота воздействия, Гц;

f_0 — собственная частота системы, Гц.

Одним из ключевых критериев оценки эффективности виброизоляции верхнего строения железнодорожного пути является показатель вносимых потерь. В общем случае вносимые потери определяются как разность уровней вибрации до и после внедрения виброизоляционной системы.

На основании приведенных формул и терминов параметр вносимых потерь определяется из выражения:

$$IL(\omega) = 20 \lg \left| \frac{H_{ref}^*(i\omega)}{H_{vib}^*(i\omega)} \right|. \quad (9)$$

Расчет вносимых потерь выполняется в частотной области, поскольку эффективность виброизоляции существенно зависит от частоты возбуждения. Обычно анализ проводят в октавных или третьоктавных полосах частот в диапазоне, характерном для железнодорожных вибраций.

На низких частотах возможен эффект резонансного усиления колебаний, тогда как в области средних и высоких частот наблюдается выраженное снижение уровней вибрации. Важнейшим параметром является собственная частота системы «путь — подбалластный мат — основание». Для обеспечения эффективной виброизоляции рабочий диапазон частот внешнего воздействия должен находиться

выше собственной частоты системы. Поэтому при проектировании стремятся применять маты с пониженной динамической жесткостью, обеспечивающие смещение резонансной зоны в область низких частот.

На этапе проектирования снижение уровня вибрации можно оценить путем численного расчета [15, 16]. Если подбалластные маты укладываются непосредственно на земляное полотно, вносимые потери могут быть определены по формуле:

$$IL = 20 \lg \left[1 + \frac{s_s s_\delta}{\left[s_s \left(1 - \left(\frac{f_0}{f} \right)^2 \right) + s_\delta \right] s_M} \right], \quad (10)$$

где s_s — жесткость грунта земляного полотна, Н/м;

f_0 — собственная частота, определяемая по формуле:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s_\delta}{m}}, \quad (11)$$

где s_δ — жесткость балласта, Н/м;

m — неподрессоренная масса колесной пары, кг;

f — частота воздействия, Гц;

s_M — жесткость подбалластного мата, определяемая по формуле:

$$s_M = s_{Mdyn} A(1 + i\eta), \quad (12)$$

где s_{Mdyn} — удельная динамическая жесткость подбалластного мата для соответствующего диапазона частот, Н/м³;

A — эффективная площадь балласта, которая определяется на основе конической конфигурации размещения и распределения нагрузки под шпалами, м².

Параметр жесткости подбалластного мата является прямым связующим между лабораторной идентификацией комплексной динамической жесткости мата на вибростенде и расчетом вносимых потерь в конструкции пути, так как достаточно перейти от полной жесткости к площадной характеристике согласно формуле (13), а затем подставить ее в расчетную модель вносимых потерь:

$$s_M = \frac{k^*}{A}. \quad (13)$$

Оценочные результаты расчетов для типовой и виброизоляционной систем визуализированы на рис. 2 в виде зависимостей передаточной способности и вносимых потерь от частот в 1/3 октавы. Графики демонстрируют область эффективности виброизоляции примерно при частоте $f > 33$ Гц, где $IL > 0$ дБ.

Таким образом, анализ зависимости $|H(i\omega)|$ от частоты позволяет выявлять резонансные области, диапазоны виброизоляции и частоты наиболее эффективной или, наоборот, наименее эффективной передачи воздействия через систему, а результаты расчета вносимых потерь являются обоснованием применения подбалластных матов в системе виброизоляции верхнего строения пути и позволяют прогнозировать снижение вибрационного воздействия, а также выбирать параметры упругих элементов на стадии проектирования.

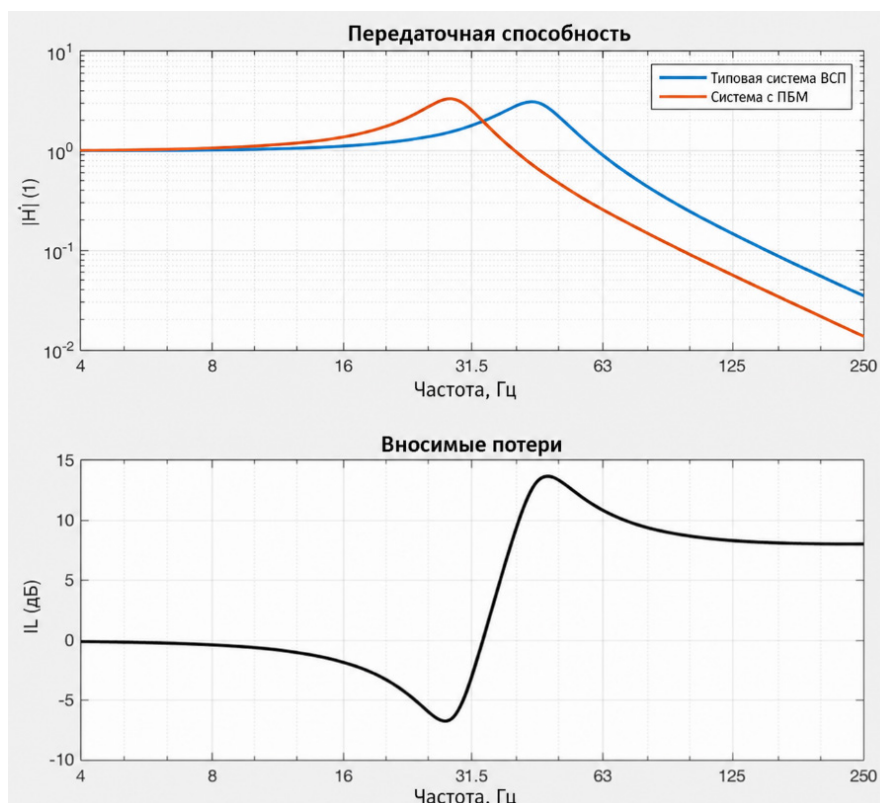


Рис. 2. Частотные зависимости передаточной способности и вносимых потерь типовой конструкции пути и виброизоляционной системы с подбалластным матом

Экспериментальный метод оценки упругих элементов

Для лабораторного ядра методики опорными документами являются зарубежные стандарты [17, 18], которые предполагают косвенный метод вибропередачи при известной нагрузочной массе и разделяют низкочастотную и высокочастотную динамическую жесткость под статическим предварительным нагружением.

В рамках косвенного метода оценки динамических свойств упругого материала, описанного в стандарте ISO 10846-3 [17], для генерации колебаний обычно применяют вибростенд, позволяющий рассмотреть несколько типов воздействия. Наиболее распространенными примерами являются гармонические синусоидальные сигналы, линейные или логарифмические синусоидальные сигналы и случайные возбуждения.

Наиболее точным примером является установка, представленная на рис. 3. Эта система состоит из двух масс: опорной плиты (базовой массы m_1), которая покоится за счет изоляционных пружин с общей жесткостью k_1 и вязким демпфированием c_1 , и груза (подвешенной массы m_2). Динамическая жесткость и вязкое демпфирование упругого элемента обозначены как k_e и c_e . Система должна быть спроектирована таким образом, чтобы обе массы вибрировали исключительно в вертикальном направлении. Подвешенная масса также играет роль приложения необходимой статической предварительной нагрузки к упругому элементу. В контексте такой лабораторной установки определение динамических свойств упругого элемента получается из коэффициента передачи между вертикальным перемещением этих двух масс под действием внешнего возбуждения $f(t)$. Вертикальное перемещение обеих масс измеряется с помощью установки вибродатчиков, а возбуждение подается вибростендом. Внешнее возбуждение, прикладываемое вибростендом, должно быть задано таким образом, чтобы обеспечить линейное поведение упругого элемента [19] и обеспечить точную оценку коэффициента передачи.

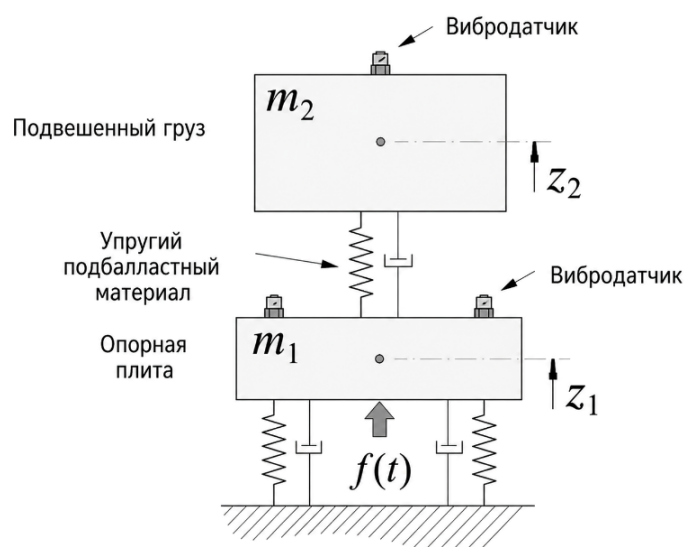


Рис. 3. Модель лабораторной испытательной установки

Рассмотрим линейную вертикальную модель с гармоническим законом $e^{i\omega t}$ для системы «плита — мат — груз». В качестве обобщенных координат вводятся параметры, представленные в таблице.

Динамические уравнения движения в частотной области принимают вид согласно формуле:

$$-k_2^*(i\omega) \cdot X_1 + (-\omega^2 m_2 + k_2^*) \cdot X_2 = 0, \quad (14)$$

где X_1 и X_2 — амплитуды смещения, зарегистрированные на нижнем (входной массы) и верхнем (выходной массы) уровнях установки.

ТАБЛИЦА. Расчетные параметры и определения

Параметр	Определение	Единица измерения
x_1, x_2	Перемещения опорной плиты и груза	м
a_1, a_2	Ускорения соответствующих масс	м/с ²
m_1, m_2	Масса опорной плиты и груза	кг
$k_2^*(\omega)$	Комплексная динамическая жесткость мата	Н/м
$k_2'(\omega)$	Действительная часть жесткости мата	Н/м
$k_2''(\omega)$	Мнимая часть жесткости мата	Н/м
$\eta_2(\omega)$	Коэффициент потерь мата, $\eta_2 = k_2'' / k_2'$	—
Z_2	Механический импеданс	Н·с/м
H_{21}	Передаточная функция X_2 / X_1	—
T_{21}	Коэффициент передачи вибрации через мат	—
C_{stat}, C_{dyn}	Статическая и динамическая удельные жесткости	Н/мм ³
A	Эффективная рабочая площадь контакта	м ²
F_{pr}	Предварительное сжатие (статическая нагрузка)	Н
$IL(\omega)$	Вносимые потери (insertion loss)	дБ

Согласно формулам (6, 7), коэффициент передачи вибрации через мат между плитой и грузом вычисляется по формуле:

$$T_{21}(\omega) = \left| \frac{X_2}{X_1} \right| = \left| \frac{A_2}{A_1} \right| = \left| \frac{k_2^*}{k_2^* - \omega^2 m_2} \right|. \quad (15)$$

Коэффициент передачи является чистым индикатором работы мата и определяет, насколько колебания опорной плиты передаются на верхнюю плиту через испытываемую вставку в виде подбалластного мата.

Практически важное следствие для стенда с двумя степенями свободы состоит в том, что комплексная жесткость испытываемого упругого элемента определяется на основании динамического равновесия верхнего груза. При гармоническом возбуждении опорной плиты сила, передаваемая через мат, уравнивается инерционной реакцией груза. В результате комплексная жесткость вычисляется по отношению инерционной силы груза к относительному перемещению между опорной плитой и грузом по формуле:

$$k_2^*(\omega) = \frac{F_2(\omega)}{\Delta X(\omega)} = \frac{\omega^2 m_2 X_2(\omega)}{X_1(\omega) - X_2(\omega)}, \quad (16)$$

где $F_2(\omega)$ — инерционная сила, передаваемая через мат на груз, Н;
 ΔX — относительная деформация мата, м.

Тем самым датчики на опорной плите и на грузе образуют минимально достаточную систему для идентификации именно мата, а не только общей передаточной функции стенда. Это ключевое преимущество двухступенной схемы перед одноступенным измерением общей вибропередачи.

Однако без фазовых данных и датчика силы нельзя напрямую определить комплексную передаточную жесткость согласно методике [17], так как серия данных стандартов требует измерения входных/выходных сил и работы под заданным статическим преднагрузением. Без фазы можно определить только приближенный модуль жесткости, но нельзя корректно разделить действительную и мнимую части комплексной жесткости, которые характеризует накопление упругой энергии и рассеяние энергии в материале соответственно. Следовательно, для вычисления комплексной жесткости нужны не только амплитуды смещений, но и фазовый сдвиг между ними согласно выражению:

$$\begin{cases} k^* = \sqrt{k'^2 + k''^2} \\ k' = \frac{F}{X} \cdot \cos \delta, \\ k'' = \frac{F}{X} \cdot \sin \delta \end{cases} \quad (17)$$

где F — амплитуда инерционной силы, Н;

δ — фазовый угол сдвига между нагрузкой и смещением.

Таким образом, при наличии только двух датчиков перемещения — на верхней массе и на плите основания — надежно идентифицируемой величиной является амплитудная передаточная функция перемещения.

Аналитический импедансный метод

Аналитический импедансный подход основан на представлении системы «путь — подбалластный мат — основание» в виде расчетной схемы с сосредоточенными массами и упругими элементами. Подбалластный мат моделируется как вязкоупругий элемент (пружина с демпфером), характеризующийся своей динамической жесткостью и коэффициентом потерь. Ввод матов снижает общую жесткость нагружения грунта, так называемый динамический импеданс системы «путь — основание», что приводит к уменьшению передачи вибраций на высоких частотах за счет эффекта упругой развязки [20].

Для правильной оценки необходимо анализировать частотную характеристику системы. Критерием эффективности служат вносимые потери: обычно маты обеспечивают заметное снижение вибраций в средне- и высокочастотном диапазоне, при этом на низких частотах (ниже собственной частоты системы) может наблюдаться некоторое увеличение виброотклика [21].

Импедансный подход удобен тем, что сводит задачу вибропередачи к соотношению между динамическим сопротивлением источника, упругой прослойки и принимающей конструкции.

С одной стороны, для импедансной модели также нужен комплексный отклик (амплитуда + фаза) или измерение силы, но в качестве альтернативного расчета возможно идентифицировать эквивалентную SDOF-модель виброизолятора в виде системы «масса — упругость — демпфер» с одной степенью свободы в области окрестности доминирующего резонанса с параметрами, пригодными для импедансных расчетов и калибровки модели конечных элементов [22].

Для упругих матов это методически согласуется с железнодорожным стандартом [18], который определяет низкочастотную динамическую удельную жесткость на 5–20 Гц и высокочастотную динамическую удельную жесткость на 10–160 Гц под статическим преднагружением, причем именно высокочастотная характеристика рассматривается как входная величина для вибрационных расчетов. В обзорных работах экспериментально определенные статические и динамические удельные жесткости используются в качестве вводных данных для модели конечных элементов пути [23].

Предлагаемая методика расчета основана на использовании результатов лабораторных испытаний подбалластных матов и их последующей интерпретации в терминах эквивалентного динамического импеданса виброзащитной системы, что позволяет перейти от локальной оценки виброизоляционных свойств подбалластного мата к прогнозированию распространения вибраций в грунте.

В отличие от прямых численных методов, импедансный подход позволяет учитывать экспериментально определенные свойства подбалластного мата без введения дополнительных априорных предположений о его материальной модели.

В ходе приведенных ранее лабораторных испытаний на вибростенде регистрируются амплитуды гармонических смещений по трем направлениям (X , Y , Z) с использованием двух вибропреобразователей согласно рис. 3. Измерения выполняются для системы с упругим матом и системы без него, а также при нескольких уровнях предварительной статической нагрузки.

Для перехода к импедансному методу используется эквивалентная одномассовая колебательная модель, представляющая собой систему с сосредоточенной массой, упругостью и демпфированием. В качестве эквивалентной массы принимается суммарная масса нагрузочной плиты и части массы образца.

По экспериментально полученным частотным характеристикам коэффициента передачи определяется резонансная частота системы f_n , соответствующая максимуму функции $T_z(f)$.

Эквивалентная динамическая жесткость системы рассчитывается по формуле:

$$k_{eq} = (2\pi f_n)^2 M, \quad (18)$$

где M — эквивалентная суммарная масса нагрузочной плиты и части массы образца, кг.

Эквивалентный коэффициент вязкого демпфирования определяется на основе ширины резонансного пика по методу половинной мощности по формуле:

$$c_{eq} = 2d\sqrt{k_{eq}M}, \quad (19)$$

где d — коэффициент демпфирования, определяемый по формуле:

$$d = \frac{f_2 - f_1}{2f_n}, \quad (20)$$

где f_1 и f_2 — частоты, на которых амплитуда коэффициента передачи уменьшается до уровня $1/\sqrt{2}$ от максимального значения [24].

Эквивалентный механический импеданс виброзащитной системы определяется в виде частотно-зависимой функции, а поскольку фазовые характеристики не измеряются, в расчетах используется модуль импеданса согласно формуле:

$$|Z| = \sqrt{c_{eq}^2 + \left(\omega M - \frac{k_{eq}}{\omega} \right)^2}. \quad (21)$$

В свою очередь интерпретация метода в действительности для прогнозирования снижения вибрации в грунте осуществляется соотношением импедансов системы «путь — подбалластный мат — основание» при помощи относительного показателя согласно формуле:

$$R_{\text{грунт}} = 20 \lg \left(\frac{|Z_{\text{грунт}}| + |Z_{\text{мат}}|}{|Z_{\text{грунт}}|} \right), \quad (22)$$

где $Z_{\text{мат}}$ — эквивалентный импеданс подбалластного мата;

$Z_{\text{грунт}}$ — динамический импеданс грунта.

В качестве импеданса грунта могут использоваться литературные данные для характерных типов грунтов или расчетные значения, полученные из упрощенных геотехнических моделей.

Такой подход позволяет оценивать диапазоны частот, в которых применение подбалластных матов наиболее эффективно, и сравнивать различные конструкции матов по влиянию на вибрационное поле в грунте.

Стоит отметить, что импеданс также влияет и на вносимые потери. Чем больше разница между импедансом источника вибрации и импедансом изолируемой конструкции, тем эффективнее гасятся колебания [25].

Для расчета вносимых потерь мата на уровне всей системы пути удобно вернуться к классической трехимпедансной постановке согласно рис. 4 [26], где

верхнее строение пути над матом имеет интерфейсный импеданс Z_i , основание — Z_0 , упругий мат — Z_M . Тогда вносимые потери вычисляются по формуле:

$$IL = 20 \lg \left| 1 + \frac{\frac{1}{Z_M}}{\frac{1}{Z_i} + \frac{1}{Z_0}} \right| = 20 \lg \left| 1 + \frac{\frac{i\omega}{s_M}}{\frac{1}{Z_i} + \frac{1}{Z_0}} \right|. \quad (23)$$

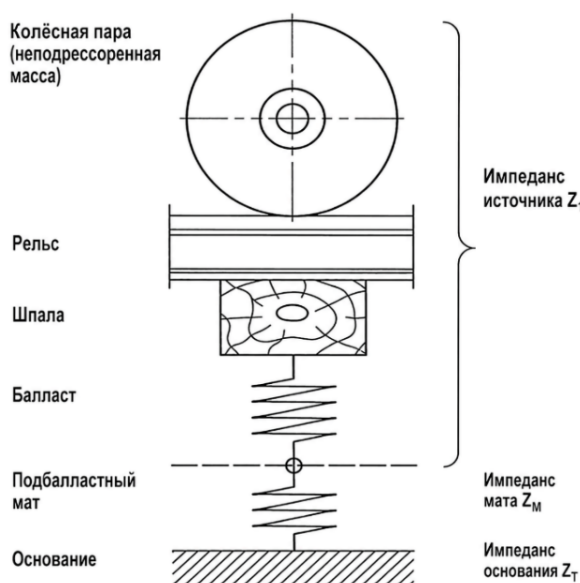


Рис. 4. Аналитическая модель виброизоляции системы с подбалластными матами

Практическая значимость импедансного подхода заключается в возможности связать результаты лабораторных испытаний подбалластного мата с расчетной оценкой его работы в составе системы «ВСП — мат — основание». В отличие от лабораторной двухмассовой модели, характеризующей передачу вибрации через отдельный образец, импедансная модель учитывает взаимодействие динамических сопротивлений мата, пути и основания. Эквивалентная одномассовая модель при этом используется для определения исходных параметров — динамической жесткости и демпфирования, а импедансная модель обеспечивает их дальнейшую интерпретацию в виде частотно-зависимого показателя и позволяет рассчитывать вносимые потери.

По сравнению с конечно-элементными моделями импедансный подход требует меньшего количества исходных данных и вычислительных ресурсов, благодаря чему может применяться для предварительной оценки и отбора вариантов подбалластных матов. Его преимуществом является возможность непосредственного использования экспериментально определенных характеристик без детального задания пространственной модели материала. Вместе с тем импедансный подход не позволяет определить локальные деформации и пространственное

вибрационное поле, поэтому для детального проектирования его целесообразно применять совместно с конечно-элементными моделями. Таким образом, методика может обеспечить воспроизводимую оценку влияния подбалластных матов на распространение вибрации в грунте, что, в свою очередь, требует подтверждения путем дальнейших численных исследований.

Заключение

Влияние подбалластных матов на снижение вибрации следует оценивать как задачу согласования трех элементов: материала упругого мата, конструкции железнодорожного пути и подвижного состава. На уровне материала определяющими являются комплексная динамическая жесткость, коэффициент потерь и их частотная зависимость; на уровне верхнего строения пути и подвижного состава — соотношение импедансов, собственная частота системы, распределение масс, геометрия контакта «колесо — путь», преднагружение и диапазон частот.

Аналитический импедансный метод для подбалластных матов целесообразно строить как последовательность моделей. Первый уровень — вертикальная модель «источник — мат — основание» с одной степенью свободы, которая нужна для быстрых инженерных оценок вносимых потерь, жесткости и частотных характеристик системы. Второй уровень — модель пути с несколькими степенями свободы, в которой отдельно выделены рельс, шпала, балласт и основание. Третий уровень — пространственная модель, необходимая для расчета распространения волн в грунте. Наиболее актуальным выглядит комбинированный метод — лабораторное определение статических и динамических характеристик, комбинирование импедансной модели с многостепенной системой или моделью конечных элементов пути и последовательная оценка передаточной способности и вносимых потерь для требуемого диапазона частот. Такой подход лучше всего согласует нормативные испытания упругого мата с существующей задачей железнодорожной виброизоляции.

Ключевое практическое решение при выборе мата состоит в выборе допустимого компромисса — подбора характеристик мата, которые обеспечат достаточное снижение вибраций без избыточных деформаций пути. Численные исследования показывают, что снижение жесткости мата повышает эффективность виброизоляции, но одновременно сопровождается ростом вертикальных прогибов пути, что ограничивает минимально допустимую жесткость с точки зрения стабильности пути. Отсюда слишком мягкий мат обычно улучшает виброизоляцию, жесткий мат лучше работает как защитный элемент балласта, но слабее как виброизолятор. По этой причине в зарубежных исследованиях различают маты, предназначенные для защиты балластного слоя, и маты, ориентированные на снижение вибрации. Следовательно, для виброизоляции, особенно на жестких искусственных основаниях, рационально использовать более мягкие маты, а для

снижения контактных напряжений допустимо применять более жесткие. Аналитическая модель позволяет провести параметрический анализ, сравнить разные значения динамической жесткости и демпфирования мата, оценить влияние его толщины и массы балласта на вносимые потери. Таким образом, импедансный метод дает ценную информацию для оптимизации конструкции виброзащиты.

Список источников

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. No. 402. Pp. 142–163.
2. Stolarik M., Pinka M., Nedoma J. Ground-Borne Vibration Due to Construction Works with Respect to Brownfield Areas // *Appl. Sci*. 2019. Vol. 9. Art. 3766.
3. RECYTRACK Project: Elastomeric Eco-Friendly Material Based on End-of-Life Tires Blended with Organic Bind Resin for Railway Applications / J. Cardona [et al.] // *J. Mech. Eng. Autom.* 2014. Vol. 4. Pp. 165–171.
4. The Use of Elastic Elements in Railway Tracks: A State of the Art Review / M. Sol-Sánchez [et al.] // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 75. Pp. 293–305.
5. Viscoelastic Dynamic Models of Resilient Elements Used in Railway Tracks / A. Zbiciak [et al.] // *Proceedings of the MATEC Web of Conferences*. Cracow, Poland: EDP Sciences, 2016. Vol. 86. Art. 01015.
6. Zhang J., Richards C.M. Parameter Identification of Analytical and Experimental Rubber Isolators Represented by Maxwell Models // *Mech. Syst. Signal Process.* 2007. Vol. 21. Pp. 2814–2832.
7. Peres M.A., Bono R.W. Modal Testing and Shaker Excitation: Setup Considerations and Guidelines // *Technical Report, SAE Technical Paper*. Troy, MI, USA: SAE International, 2011.
8. DIN 45673-1:2010-08. Mechanical Vibration. Resilient Elements Used in Railway Tracks. Part 1: Terms and Definitions, Classification, Test Procedures. Berlin: Beuth Verlag, 2010.
9. DIN 45673-4:2008. Mechanical Vibration. Resilient Elements Used in Railway Tracks. Part 4: Analytical Evaluation of Insertion Loss of Mounted Track Systems. Berlin: Beuth Verlag, 2008.
10. DIN 45673-5:2010-08. Mechanical Vibration. Resilient Elements Used in Railway Tracks. Part 5: Laboratory Test Procedures for Under-Ballast Mats. Berlin: Beuth Verlag, 2010.
11. DIN 45673-7:2010-08. Mechanical Vibration. Resilient Elements Used in Railway Tracks. Part 7: Laboratory Test Procedures for Resilient Elements of Floating Slab Track Systems. Berlin: Beuth Verlag, 2010.
12. Static and Dynamic Characteristics of Resilient Mats for Vibration Isolation of Railway Tracks / C. Kraskiewicz [et al.] // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 153. Pp. 317–324.
13. Конон А. А. Определение собственных частот колебаний элементов железнодорожного пути под поездной нагрузкой и выбор упругих амортизаторов // *Бюллетень результатов научных исследований*. 2021. Вып. 4. С. 57–64. DOI: 10.20295/2223-9987-2021-4-57-64
14. 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

15. Буторина М. В., Иванов П. В., Петряев А. В. Снижение виброакустического воздействия высокоскоростных поездов // Путь и путевое хозяйство. 2018. № 7. С. 15–19.
16. Wettschureck R. G., Kurze U. J. Einfügungsdämm-Maß von Unterschottermatten (Insertion Loss Factor of Under Ballast Mats) // ACUSTICA. 1985. Vol. 58. Pp. 177–182.
17. ISO 10846-3:2002. Acoustics and Vibration–Laboratory Measurement of Vibro-Acoustic Transfer Properties of Resilient Elements. Part 3: Indirect Method for Determination of the Dynamic Stiffness of Resilient Supports for Translatory Motion. Geneva: ISO, 2002.
18. EN 17282:2020. Railway Applications–Infrastructure–Under Ballast Mats. Brussels: CEN, 2020.
19. ISO 10846-1:2008. Acoustics and vibration–Laboratory Measurement of Vibro-Acoustic Transfer Properties of Resilient Elements. Part 1: Principles and Guidelines. Geneva: ISO, 2008.
20. Ground Vibration Mitigation by Using Ballast Mat / H. Yuan [et al.] // Vibroengineering PROCEDIA. 2021. Vol. 37. Pp. 19–23. DOI: 10.21595/vp.2021.21902
21. Vibration Reduction in Ballasted Track Using Ballast Mat: Numerical and Experimental Evaluation by Wheelset Drop Test / B. Hou [et al.] // Applied Sciences. 2022. Vol. 12, no. 4. Art. 1844.
22. ISO 10846-2:2008. Acoustics and Vibration–Laboratory Measurement of Vibro-Acoustic Transfer Properties of Resilient Elements. Part 2: Direct Method for Determination of the Dynamic Stiffness of Resilient Supports for Translatory Motion. Geneva: ISO, 2008.
23. Kraskiewicz C., Zbiciak A. Experimental and Numerical Testing of Prototypical Under Ballast Mats (Ubms) Produced from Deconstructed Tires–The Effect of Mat Thickness // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 369.
24. Лысюк В. С., Семенов В. Т., Ермаков В. М. Управление надежностью бесстыкового пути / под ред. В. С. Лысюка. М.: Транспорт, 1999. 373 с.
25. Wettschureck R. G., Heim M., Mühlbachler 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.
26. 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.

Дата поступления: 07.07.2026

Решение о публикации: 15.08.2026

Информация об авторах:

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

ПЕТРЯЕВ Андрей Владимирович — доктор техн. наук, старший научный сотрудник кафедры «Строительство дорог транспортного комплекса»; pgups60@mail.ru

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

Assessment of the Effect of Under-Ballast Mats on Vibration Reduction

N. K. Maslov, A. V. Petriaev, A. A. Sajdaliev

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

For citation: Maslov N. K., Petryaev A. V., Sajdaliev A. A. Assessment of the Effect of Under-Ballast Mats on Vibration Reduction // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 3, pp. 59–77. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-59-77 (In Russian)

Abstract

Objective: development and substantiation of a computational and experimental approach to assessing the impact of under-ballast mats on reducing vibration in the track on railway lines, providing a transition from laboratory-determined characteristics of elastic material to the calculation of vibration transmissibility, insertion losses, dynamic stiffness and mechanical impedance of the “track–UBM–foundation” system.

Methods: this paper examines existing viscoelastic models, vibration isolation assessment methods, and the requirements of DIN 45673, ISO 10846, and EN 17282. Standard and vibration isolation mechanical models of the track superstructure, as well as methods for calculating complex dynamic stiffness, transmissibility, and insertion loss in the frequency domain, are considered. For experimental evaluation, an indirect test method is proposed using a vibration rig with harmonic excitation, static preload, and recording of the displacement amplitudes of the support plate and loading mass. Results are processed using an equivalent single-mass model, which allows for the determination of the equivalent dynamic stiffness, damping coefficient, and mechanical impedance modulus based on the resonant frequency and peak width. An analytical impedance approach is proposed for the potential prediction of vibration impact, taking into account the ratio of the dynamic resistances of the track, mat, and foundation. **Results:** it has been established that the vibration isolation efficiency of under-ballast mat is determined not only by its dynamic stiffness and loss factor, but also by the system’s natural frequency and the impedance ratio of the structural elements. It has been shown that resonant amplification of vibrations is possible at frequencies below the natural frequency, while in the mid- and high-frequency ranges, the under-ballast mat reduces transmitted vibration. In the considered calculation example, positive insertion losses were obtained at frequencies above 33 Hz. The possibility of determining the equivalent dynamic stiffness, damping coefficient, and mechanical impedance modulus based on the amplitude frequency response obtained using two vibration transducers is substantiated. It has been determined that without measuring the phase shift or dynamic force, it is impossible to accurately determine the real and imaginary parts of the complex stiffness and complex impedance. **Practical significance:** the proposed approach allows the use of laboratory test results for under-ballast mats for preliminary calculations of insertion losses, determining the operating ranges of vibration isolation, and comparing materials in terms of dynamic stiffness and damping. The resulting equivalent characteristics can be used as input for a finite element model of a railway track.

Keywords: vibration, under-ballast mats, vibrodynamic impact, insertion loss, vibration transmissibility, complex dynamic stiffness, impedance, damping, vibration table

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, no. 402, pp. 142–163.
2. Stolarik M., Pinka M., Nedoma J. Ground-Borne Vibration Due to Construction Works with Respect to Brownfield Areas, *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, art. 3766.

3. Cardona J., et al. RECYTRACK Project: Elastomeric Eco-Friendly Material Based on End-of-Life Tires Blended with Organic Bind Resin for Railway Applications, *Journal of Mechanical Engineering and Automation*, 2014, vol. 4, pp. 165–171.
4. Sol-Sánchez M., et al. The Use of Elastic Elements in Railway Tracks: A State of the Art Review, *Construction and Building Materials*, 2015, vol. 75, pp. 293–305.
5. Zbiciak A., et al. Viscoelastic Dynamic Models of Resilient Elements Used in Railway Tracks, *Proceedings of the MATEC Web of Conferences*, Cracow, Poland, EDP Sciences, 2016, vol. 86, art. 01015.
6. Zhang J., Richards C.M. Parameter Identification of Analytical and Experimental Rubber Isolators Represented by Maxwell Models, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2007, vol. 21, pp. 2814–2832.
7. Peres M.A., Bono R.W. Modal Testing and Shaker Excitation: Setup Considerations and Guidelines, *Technical Report, SAE Technical Paper*, Troy, MI, USA, SAE International, 2011.
8. DIN 45673-1:2010-08. Mechanical Vibration. Resilient Elements Used in Railway Tracks. Part 1: Terms and Definitions, Classification, Test Procedures, Berlin, Beuth Verlag, 2010.
9. DIN 45673-4:2008. Mechanical Vibration. Resilient Elements Used in Railway Tracks. Part 4: Analytical Evaluation of Insertion Loss of Mounted Track Systems, Berlin, Beuth Verlag, 2008.
10. DIN 45673-5:2010-08. Mechanical Vibration. Resilient Elements Used in Railway Tracks. Part 5: Laboratory Test Procedures For Under Ballast Mats, Berlin, Beuth Verlag, 2010.
11. DIN 45673-7:2010-08. Mechanical Vibration. Resilient Elements Used in Railway Tracks. Part 7: Laboratory Test Procedures for Resilient Elements of Floating Slab Track Systems, Berlin, Beuth Verlag, 2010.
12. Kraskiewicz C., et al. Static and Dynamic Characteristics of Resilient Mats for Vibration Isolation of Railway Tracks, *Procedia Engineering*, 2016, vol. 153, pp. 317–324.
13. Konon A.A. Opredelenie sobstvennykh chastot kolebaniy elementov zheleznodorozhnogo puti pod poezdnoy nagruzkoy i vybor uprugikh amortizatorov [Determination of Natural Frequencies of Railway Track Elements under Train Load and Selection of Elastic Shock Absorbers], *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy [Bulletin of Research Results]*, 2021, iss. 4, pp. 57–64. DOI: 10.20295/2223-9987-2021-4-57-64 (In Russian)
14. Maslov N. K., Val'tseva T. Yu., Sajdaliev A. A. Laboratornye ispytaniya vibroizolyatsionnykh svoystv uprugikh podballastnykh materialov [Laboratory Testing of Vibration Isolation Properties of Elastic Under-Ballast Materials], *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy [Bulletin of Research Results]*, 2025, iss. 3, pp. 91–106. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-91-106 (In Russian)
15. Butorina M. V., Ivanov P. V., Petryaev A. V. Snizhenie vibroakusticheskogo vozdeystviya vysokoskorostnykh poezdov [Reduction of Vibroacoustic Impact of High-Speed Trains], *Put' i putevoe khozyaystvo [Track and Track Facilities]*, 2018, no. 7, pp. 15–19. (In Russian)
16. Wettschureck R.G., Kurze U.J. Einfügungsdämm-Maß von Unterschottermatten (Insertion Loss Factor of Under Ballast Mats), *ACUSTICA*, 1985, vol. 58, pp. 177–182.

17. ISO 10846-3:2002. Acoustics and Vibration–Laboratory Measurement of Vibro-Acoustic Transfer Properties of Resilient Elements. Part 3: Indirect Method for Determination of the Dynamic Stiffness of Resilient Supports for Translatory Motion, Geneva, ISO, 2002.
18. EN 17282:2020. Railway Applications–Infrastructure–Under Ballast Mats, Brussels: CEN, 2020.
19. ISO 10846-1:2008. Acoustics and Vibration–Laboratory Measurement of Vibro-Acoustic Transfer Properties of Resilient Elements. Part 1: Principles and Guidelines, Geneva, ISO, 2008.
20. Yuan H., et al. Ground Vibration Mitigation by Using Ballast Mat, *Vibroengineering PROCEDIA*, 2021, vol. 37, pp. 19–23. DOI: 10.21595/vp.2021.21902
21. Hou B., et al. Vibration Reduction in Ballasted Track Using Ballast Mat: Numerical and Experimental Evaluation by Wheelset Drop Test, *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, no. 4, art. 1844.
22. ISO 10846-2:2008. Acoustics and Vibration–Laboratory Measurement of Vibro-Acoustic Transfer Properties of Resilient Elements. Part 2: Direct Method for Determination of the Dynamic Stiffness of Resilient Supports for Translatory Motion, Geneva, ISO, 2008.
23. Kraskiewicz C., Zbiciak A. Experimental and Numerical Testing of Prototypical Under Ballast Mats (UBMs) Produced from Deconstructed Tires–The Effect of Mat Thickness, *Construction and Building Materials*, 2023, vol. 369.
24. Lysyuk V.S., Semenov V.T., Ermakov V.M. Upravlenie nadyozhnost'yu besstykovogo puti [Managing the Reliability of Continuous Welded Rail Track], edited by V.S. Lysyuk, Moscow, Transport, 1999, 373 p. (In Russian).
25. Wettschureck R.G., Heim M., Mühlbachler 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.
26. Wettschureck R.G. Vibration and Structure-Borne Sound Isolation by Means of Cellular Polyurethane (PUR) Elastomers, *Proceedings Vibrationsdagen (SVIB)*, Sweden, Stockholm, 1994, pp. 21–52.

Received: July 07, 2026

Accepted: August 15, 2026

Author's information:

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

Andrej V. PETRYAEV — Dr. Sci. in Engineering, Senior Researcher of the “Road Construction of Transport Systems” Department; pgups60@mail.ru

Abdunaim A. SAJDALIEV — Postgraduate Student of the “Road Construction of Transport Systems” Department; saidaliev18@mail.ru

ДК 625.03

Влияние ширины колеи на устойчивость движения трамвая при повышении скоростей движения

Е. П. Дудкин, Я. С. Хомяков

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

Для цитирования: Дудкин Е. П., Хомяков Я. С. Влияние ширины колеи на устойчивость движения трамвая при повышении скоростей движения // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 3. С. 78–92. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-78-92

Аннотация

Цель: обосновать ширину колеи для прямых участков трамвайных линий с учетом типа рельсов и подуклонки, обеспечивающую устойчивость движения при повышении скоростей для соответствия перспективам развития городского рельсового транспорта. **Методы:** выполнено многовариантное компьютерное моделирование с использованием специально разработанной модели наиболее распространенного на сегодня трехсекционного трамвая «Витязь-М» в программном комплексе «Универсальный механизм» при варьировании ширины колеи (от 1518 до 1538 мм), типа рельсов (железнодорожный — Р65 и трамвайный, желобчатый — РТ60), подуклонки (1:20 и 0) и скорости движения (10–80 км/ч). Анализировались показатели поперечных ускорений кузова и необрессоренных масс, а также направляющие усилия в набегающих колесных парах. **Результаты:** установлено, что при скоростях до 40 км/ч ширина колеи в диапазоне 1518–1538 мм не оказывает существенного влияния на поперечные ускорения кузова — они остаются ниже нормативного предела $0,2 \text{ м/с}^2$. При увеличении скорости до 50–70 км/ч переход с ширины 1524 на 1520 мм снижает поперечные ускорения кузова крайних секций на 34–44 % в зависимости от типа рельса и подуклонки, а суммарные направляющие усилия возрастают на 30–50 %, обеспечивая направляющую функцию рельсовой колеи. Дальнейшее сужение колеи до 1518 мм дает незначительный дополнительный эффект по ускорениям, но сопровождается ростом направляющих усилий до значений, создающих повышенный износ и риск заклинивания колесной пары. **Практическая значимость:** обоснована целесообразность перехода на нормативную ширину колеи 1520 мм для вновь строящихся и реконструируемых линий скоростного трамвая. Переход на колею 1520 мм позволит повысить устойчивость движения, комфорт пассажиров и снизить интенсивность бокового износа рельсов и гребней колес.

Ключевые слова: трамвай, ширина колеи, устойчивость движения, поперечные колебания, направляющие усилия, подуклонка, рельс Р65, рельс РТ60, универсальный механизм

Введение

Развитие скоростного трамвая (легкорельсового транспорта) является одним из приоритетных направлений модернизации городских транспортных систем. Повышение маршрутной скорости до 50–70 км/ч позволяет сократить время поездок, разгрузить улично-дорожную сеть и повысить привлекательность общественного транспорта [1]. В Санкт-Петербурге реализуются проекты строительства новых линий (в Славянку, к аэропорту Пулково), ориентированных на использование современных низкопольных многосекционных трамваев, таких как «Витязь-М» [2].

Однако эксплуатация современного подвижного состава на существующих путях выявила серьезную проблему: при скоростях выше 50 км/ч на прямых участках возникают интенсивные поперечные колебания (виляние) кузова, сопровождающиеся ростом виброускорений до уровней, превышающих санитарные нормы. Экспериментальные исследования, проведенные на трамваях «Витязь-М» в трамвайном парке № 8 СПб ГУП «Горэлектротранс», доказали возникновение повышенных колебаний на скоростях от 50 км/ч, которые дают поперечные ускорения до $0,7 \text{ м/с}^2$, что в 3,5 раза превышает допустимое значение $0,2 \text{ м/с}^2$, согласно СП 2.5.3650-20 [3]. При этом геометрические параметры пути (ширина колеи, уровень) находились в пределах нормативных допусков [4].

Данный факт указывает на несовершенство действующих норм устройства и содержания трамвайных путей при повышении скоростей движения. Одним из основных параметров, определяющих устойчивость движения экипажа, является ширина колеи, которая вместе с подуклонкой и типом рельса формирует зазор между гребнем колеса и рабочей гранью головки рельса. Именно величина этого зазора задает амплитуду свободного виляния колесной пары и, как следствие, уровень поперечных колебаний экипажа.

Исторический опыт и многосторонние исследования привели к уменьшению ширины колеи в прямых участках на магистральных железных дорогах с 1524 до 1520 мм [5]. Для метрополитена проводились исследования по сужению колеи даже до 1516 мм [6], но в итоге также была закреплена ширина 1520 мм. Однако для трамвайного транспорта системные исследования влияния ширины колеи на динамику современных многосекционных вагонов до настоящего времени не проводились, а действующие нормы [7, 8] по-прежнему устанавливают нормативную ширину 1524 мм с допуском $+12...-4 \text{ мм}$.

Исходя из этого были выполнены исследования по обоснованию ширины колеи для прямых участков трамвайных линий с учетом типа рельсов (железнодорожный — Р65 и трамвайный — РТ60) и подуклонки (1:20 и 0) при повышении скоростей движения.

Методика исследования

Для исследования выбран трехсекционный трамвай 71-931М «Витязь-М» производства ООО «ПК Транспортные системы», способный обеспечить развитие скоростных трамвайных линий. Ходовая часть вагона состоит из трех двухосных тележек: крайние — поворотные, средняя — неповоротная. Конструкционная скорость — 75 км/ч, масса тары — 37 т [9]. Тележки имеют две ступени рессорного подвешивания, буксовые узлы оснащены сферическими самоустанавливающимися подшипниками.

Для данного трамвая разработана и верифицирована математическая (динамическая) модель. Моделирование выполнено в программном комплексе

«Универсальный механизм», реализующем методы многотельной динамики. Подробное описание разработки и верификации модели приведено в работе [10].

Модель включает 27 абсолютно твердых тел: 6 колесных пар, 12 корпусов букс, 3 рамы тележек, 3 шкворневые балки, 3 секции кузова. Учтены нелинейные характеристики упруго-диссипативных связей в первой и второй ступенях подвешивания, трение в шкворневых узлах поворотных тележек, а также люфты в буксовых подшипниках. Контакт «колесо – рельс» описывается моделью В. Кика и И. Пиотровского с использованием реальных профилей колеса и рельсов (Р65 по ГОСТ Р 51685-2022 [11] и РТ60 по ГОСТ 55941-2014 [12]). Ширина колеи задавалась варьируемым параметром в диапазоне от 1518 до 1538 мм с шагом 1 мм. Подуклонка рельсов принималась равной 1:20 либо 0 (без подуклонки). Путь моделировался как инерционная система с тремя степенями свободы на каждую рельсовую нить (вертикальное и поперечное перемещения, поворот), подрельсовое основание — эквивалентными упруго-вязкими связями. Неровности пути задавались в соответствии с ПНСТ 511-2020 [13] для прямых участков, который определяет неровности для математического или компьютерного моделирования колебаний для оценки показателей динамических качеств вагонов по ГОСТ 33211-2014.

На рис. 1 приведен общий вид разработанной модели трамвайного экипажа на рельсовом пути, а на рис. 2 — вид тележки.

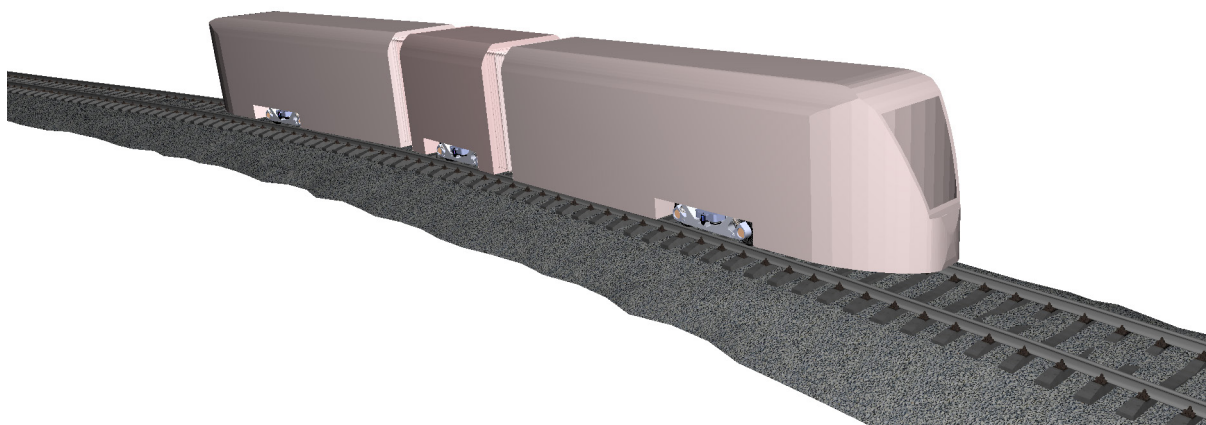


Рис. 1. Общий вид модели трамвайного экипажа «Витязь»

Было выполнено более 600 вариантов расчетов следующих показателей:

- среднеквадратичные значения (СКЗ) поперечных ускорений кузова в уровне пола для каждой из трех секций (SecI, SecII, SecIII);
- СКЗ поперечных ускорений необрессоренных масс в уровне букс для каждой колесной пары (КП1...КП6);
- средние значения направляющих усилий (сумм поперечных сил в контактах колес с рельсами) для каждой колесной пары ($Ny1...Ny6$).

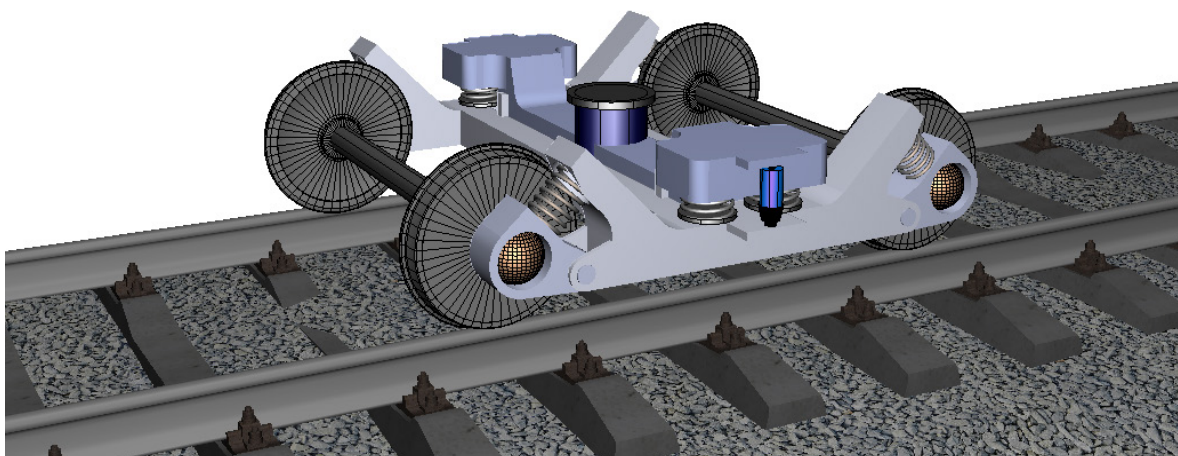


Рис. 2. Модель трамвайной тележки «Витязь»

При этом варьировались:

- тип рельса: Р65, РТ60;
- подуклонка: 1:20, 0;
- ширина колеи 1518, 1519...1538 мм (для рельса Р65), 1520, 1521...1538 мм (для рельса РТ60, так как на ширине колеи менее 1520 мм происходит заклинивание колесной пары);
- скорость движения: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 км/ч.

Нумерация колесных пар принята от головы состава: КП 1, 2 — тележка I (поворотная); КП 3, 4 — тележка II (неповоротная); КП 5, 6 — тележка III (поворотная). В каждой тележке первая по ходу движения колесная пара является набегающей, вторая — ненабегающей.

Поперечные ускорения кузова анализировались отдельно для крайних секций (SecI и SecIII) и средней секции (SecII). Направляющие усилия и ускорения необрессоренных масс рассматривались индивидуально для каждой колесной пары с целью выявления наиболее нагруженных элементов ходовой части.

Плавность движения оценивалась путем сравнения СКЗ поперечных ускорений кузова с максимально допустимой величиной 0,2 м/с², согласно СП 2.5.3650-20 [3]. Оценка воздействия на путь проводилась по величине направляющих усилий.

Результаты

Поперечные ускорения кузова

Анализ полученных данных показал, что на средней (неповоротной) секции кузова уровень поперечных ускорений на 20–35 % ниже, чем на крайних секциях, однако характер их изменения в зависимости от ширины колеи и скорости идентичен. Уровень ускорений на передней и задней секциях сопоставим. Таким образом, крайние секции являются лимитирующими по критерию комфорта пассажиров, и дальнейший анализ сосредоточен на них.

Физически это обусловлено наличием дополнительной степени свободы у крайних тележек, обеспечивающей больший диапазон поперечных перемещений кузова по сравнению с неповоротной средней тележкой. Данный результат согласуется с ранее проведенными натурными экспериментами [4], в которых значительная поперечная раскачка проявлялась именно в районе крайних тележек.

С уменьшением ширины колеи поперечные ускорения кузова уменьшаются, однако в какой-то момент происходит заклинивание колесной пары. Значения колеи, при которых происходит заклинивание, были определены при исследовании и приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Минимальная ширина колеи (мм) до заклинивания колесной пары трамвая

Рельс	Подуклонка рельсов	
	1:20	–
Р65*	1517	1519
РТ60**	1518	1520
<i>Примечания:</i> * при замере в уровне 13 мм от верхней точки поверхности катания ** при замере в уровне 8 мм от верхней точки поверхности катания		

Исходя из условия заклинивания нормативная ширина колеи не может быть меньше ширины заклинивания плюс допуск на сужение. Действующие нормы [7, 8] устанавливают допуск на сужение в размере 4 мм. При ширине колеи 1524 мм этот допуск гарантирует отсутствие заклинивания колеса при любом типе рельса и подуклонке.

В табл. 2 приведены СКЗ поперечных ускорений крайних секций кузова для рельсов Р65 с подуклонкой 1:20 — наиболее распространенного варианта устройства трамвайного пути. По этим данным построен график, приведенный на рис. 3.

ТАБЛИЦА 2. Поперечные ускорения крайних секций кузова (м/с²)
(среднеквадратичные значения)

Ширина колеи, мм	Скорость, км/ч							
	10	20	30	40	50	60	70	80
1518	0,045	0,102	0,086	0,1	0,127	0,119	0,141	0,133
1520	0,056	0,132	0,106	0,135	0,162	0,143	0,136	0,178
1522	0,065	0,188	0,152	0,177	0,229	0,224	0,21	0,257
1524	0,073	0,269	0,179	0,23	0,24	0,237	0,235	0,411

Окончание табл. 2

Ширина колеи, мм	Скорость, км/ч							
	10	20	30	40	50	60	70	80
1526	0,074	0,301	0,231	0,219	0,228	0,267	0,277	0,324
1528	0,079	0,329	0,257	0,268	0,265	0,296	0,34	0,325
1530	0,079	0,305	0,246	0,244	0,267	0,276	0,282	0,298
1532	0,089	0,309	0,242	0,286	0,307	0,316	0,339	0,343
1534	0,084	0,32	0,271	0,272	0,288	0,319	0,297	0,333
1536	0,086	0,331	0,268	0,284	0,316	0,293	0,277	0,315
1538	0,086	0,326	0,257	0,259	0,34	0,301	0,309	0,347

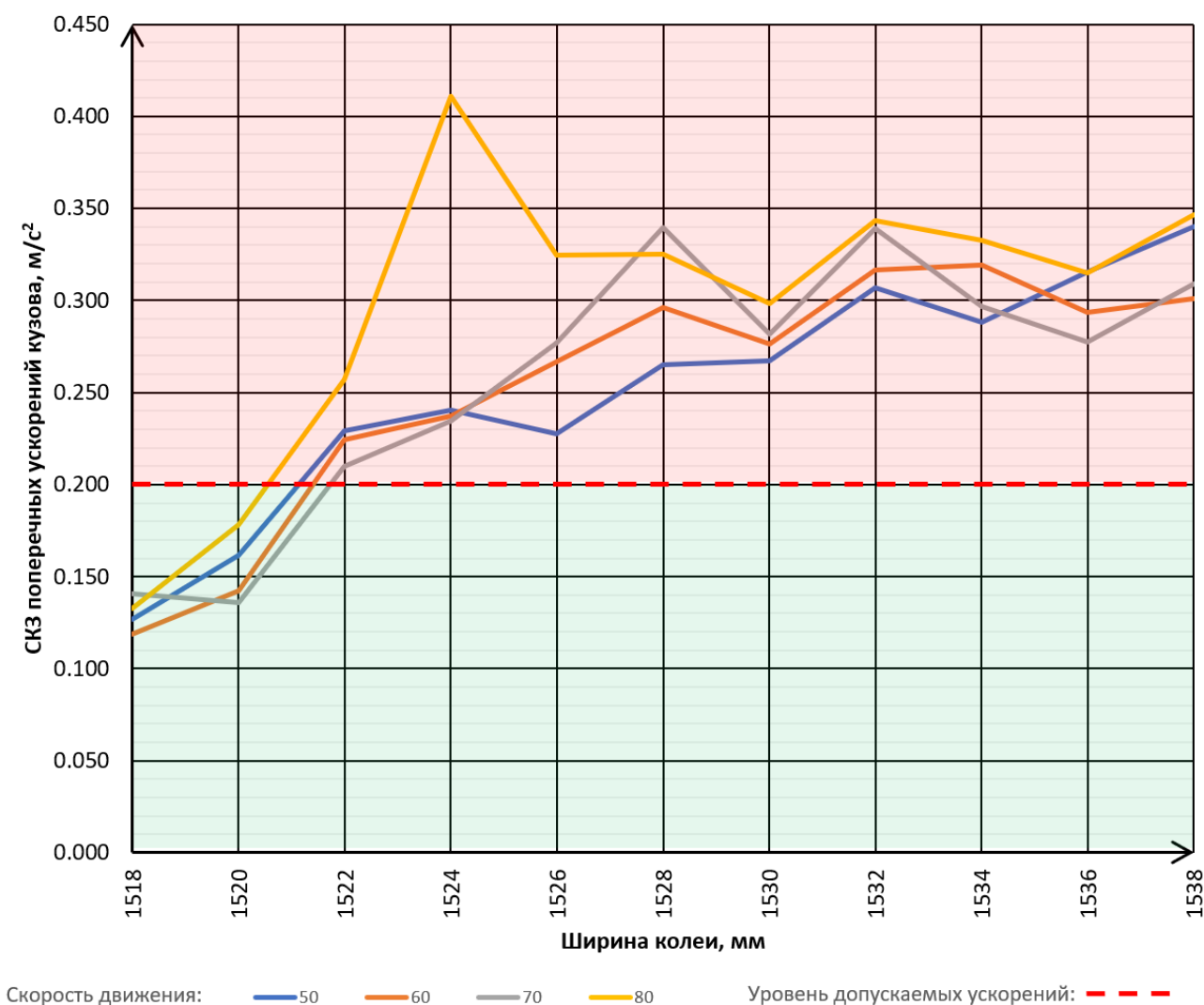


Рис. 3. Зависимость поперечных ускорений крайних секций кузова от номинальной ширины колеи для перспективных скоростей движения

Анализ табл. 2 и рис. 3 показывает:

1. При ширине колеи 1524 мм поперечные ускорения крайних секций превышают нормативный предел $0,2 \text{ м/с}^2$ уже при скорости 50 км/ч ($0,240 \text{ м/с}^2$). При верхней границе действующего допуска — колее 1536 мм — превышение нормы составляет 58 % при 50 км/ч и 39 % при 70 км/ч.

2. При ширине колеи 1520 мм все значения ускорений в диапазоне 50–70 км/ч остаются в допуске: 0,162 (50 км/ч), 0,143 (60 км/ч), 0,136 (70 км/ч) м/с^2 .

3. Переход от ширины колеи 1524 мм к 1520 мм обеспечивает снижение поперечных ускорений на 33–42 % в данном скоростном диапазоне.

Аналогичные закономерности наблюдаются и для остальных трех комбинаций «рельс — подуклонка», которые приведены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Поперечные ускорения крайних секций кузова (м/с^2) в диапазоне скоростей от 50 до 70 км/ч (среднеквадратичные значения)

Конструкция пути	Колея 1520 мм	Колея 1524 мм	Снижение, %
Р65, подуклонка 1:20	0,147	0,237	38
Р65, без подуклонки	0,077	0,125	38
РТ60, подуклонка 1:20	0,118	0,210	44
РТ60, без подуклонки	0,090	0,136	34

Во всех случаях колея 1520 мм обеспечивает соблюдение нормативного предела поперечных ускорений кузова $0,2 \text{ м/с}^2$ с запасом не менее 25 %, тогда как при колее 1524 мм норматив в ряде случаев превышен.

Влияние подуклонки

Сопоставление данных для вариантов с подуклонкой 1:20 и без подуклонки при рельсах Р65 и колее 1520 мм выявило, что отсутствие подуклонки приводит к более низким поперечным ускорениям кузова. В табл. 4 приведены эти данные для крайних секций трамвая.

Снижение ускорений при отсутствии подуклонки объясняется особенностью геометрии контакта трамвайной колесной пары и железнодорожного рельса: рельс Р65 рассчитан на взаимодействие с колесом железнодорожного профиля. Однако колеса трамвая «Витязь-М» имеют профиль, установленный нормативными требованиями трамвайного транспорта, в результате гораздо легче формируется неоптимальный двухточечный контакт, провоцирующий повышенную склонность к вилянию. Без подуклонки контактное пятно смещается ближе к кругу катания колеса, что обеспечивает более стабильное качение. При этом также уменьшается площадь контакта колеса с рельсом, повышаются контактные напряжения.

ТАБЛИЦА 4. Влияние подуклонки на СКЗ поперечных ускорений крайних секций кузова (м/с^2) при рельсах Р65 и колее 1520 мм

Скорость, км/ч	С подуклонкой 1:20	Без подуклонки	Снижение, %
50	0,162	0,066	59
60	0,143	0,079	45
70	0,136	0,087	36
80	0,178	0,130	27

Для трамвайных рельсов подуклонка 1:20 в сочетании с профилем головки формирует более благоприятную геометрию контакта. При ширине колеи 1520 мм рельсы РТ60 с подуклонкой 1:20 обеспечивают ускорение на 13–42 % ниже по сравнению с рельсами Р65 в аналогичных условиях (рис. 4).

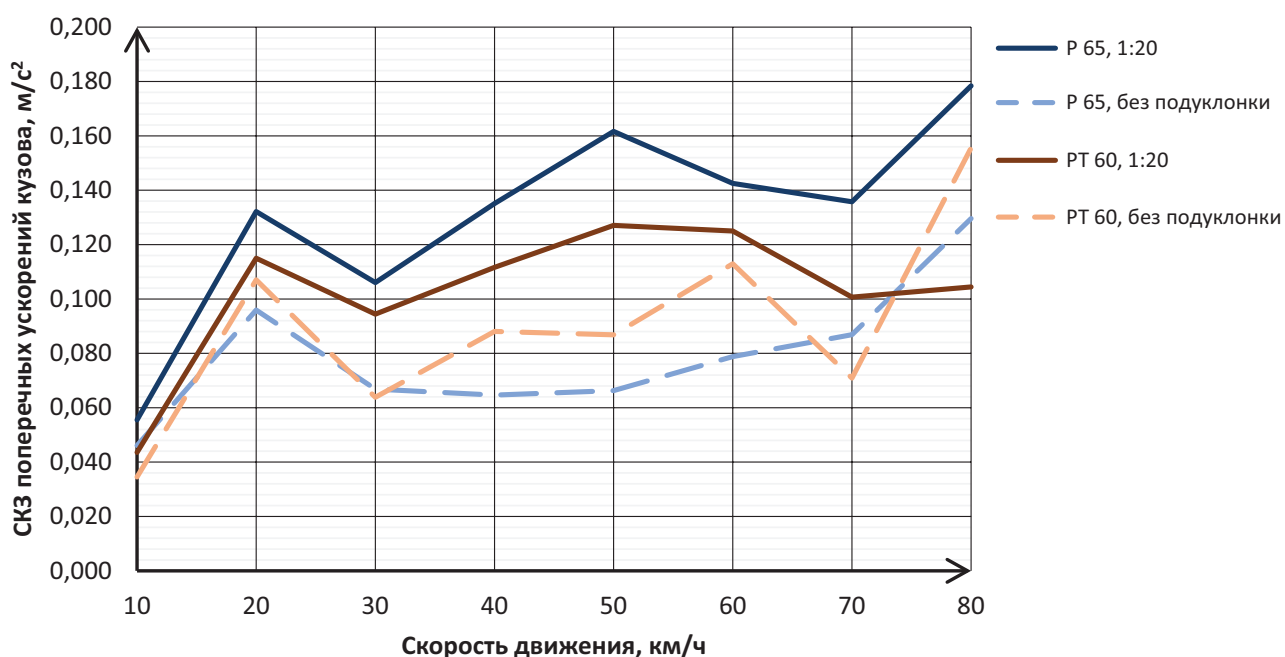


Рис. 4. Влияние подуклонки и типов рельсов на поперечные ускорения кузова при ширине колеи 1520 мм

Направляющие усилия

Направляющее усилие на колесной паре возникает при контакте гребня колеса с рабочей гранью головки рельса. Анализ направляющих усилий выявил принципиальное разделение всего диапазона ширины колеи на две зоны.

Зона направляемого движения (колея 1518–1530 мм) — направляющие усилия ненулевые на большинстве колесных пар, гребни регулярно контактируют с рельсами, рельсовая колея активно направляет экипаж.

Зона свободного виляния (колея ≥ 1531 мм) — направляющие усилия на всех колесных парах равны нулю или близки к нему, контакт гребня с рельсом практически отсутствует, колесные пары виляют свободно в пределах зазора.

В табл. 5 приведены суммарные абсолютные значения направляющих усилий по всем шести колесным парам при скорости 50 км/ч.

ТАБЛИЦА 5. Суммарные направляющие усилия (Н) при скорости 50 км/ч

Колея, мм	Р65, п/у 1:20	Р65, б/п	РТ60, п/у 1:20	РТ60, б/п
1520	302	336	196	430
1522	103	144	184	228
1524	30	60	27	62
1526	36	39	34	21
1528	9	23	10	11
1530	8	8	6	13
1534	0	0	0	1

При ширине колеи 1524 мм направляющие усилия составляют лишь 27–62 Н — это означает, что контакт гребня колеса с рельсом носит эпизодический характер и рельсовая колея практически не выполняет направляющей функции. При колее 1520 мм суммарные направляющие усилия составляют 196–430 Н, что свидетельствует о регулярном и устойчивом контакте, обеспечивающем направление экипажа.

Однако при дальнейшем сужении колеи до 1518 мм направляющие усилия возрастают до значительных величин. При рельсах Р65 без подуклонки на отдельных колесных парах зафиксированы усилия до 219 Н (КП 1, 60 км/ч) и 299 Н (КП 5, 70 км/ч), что составляет порядка 5 % от осевой нагрузки и повышает интенсивность износа.

Ускорения необрессоренных масс

Анализ СКЗ поперечных ускорений на буксах колесных пар позволяет проследить механизм формирования ускорений кузова. Выявлена ярко выраженная дифференциация: на ненабегающих колесных парах (КП 2, 4, 6) систематически появляются ускорения в 1,5–2,5 раза больше, чем на набегающих (КП 1, 3, 5).

В табл. 6 приведены СКЗ ускорений необрессоренных масс для рельсов Р65 с подуклонкой 1:20 при скорости 60 км/ч.

Наибольшие ускорения появляются на последней ненабегающей колесной паре задней поворотной тележки. Например, при колее 1538 мм и скорости 60 км/ч СКЗ ускорений на КП 6 достигает 1,32 м/с², что почти втрое превышает значение

при колее 1520 мм ($0,67 \text{ м/с}^2$). Физически это можно объяснить эффектом хлыста: колебания экипажа, усиленные последовательным прохождением через три секции, концентрируются на крайней точке.

ТАБЛИЦА 6. СКЗ поперечных ускорений необрессоренных масс
(м/с^2 , Р65, подуклонка 1:20, $V = 60 \text{ км/ч}$)

Колея, мм	Колесная пара					
	КП 1	КП 2	КП 3	КП 4	КП 5	КП 6
1520	0,478	0,732	0,429	0,537	0,448	0,670
1524	0,600	0,979	0,477	0,662	0,405	1,236
1530	0,491	0,957	0,618	0,833	0,456	1,266
1538	0,560	1,096	0,782	0,771	0,500	1,317

При этом отмечена различная реакция набегающих и ненабегающих колесных пар на изменение ширины колеи. Для набегающих колесных пар зависимость СКЗ ускорений от ширины колеи выражена слабо: разброс значений не превышает 30 %, а для ненабегающих — при увеличении колеи от 1520 до 1530 мм ускорения возрастают на 40–170 %.

Обсуждение

Совместный анализ трех уровней данных — направляющих усилий, ускорений необрессоренных масс и ускорений кузова — позволяет выстроить полную причинно-следственную модель влияния ширины колеи на устойчивость движения трамвая.

При колее 1518–1521 мм гребни колес регулярно контактируют с рельсами, возникают направляющие усилия на каждой колесной паре, что ограничивает амплитуду колебаний виляния. Ускорения необрессоренных масс на ненабегающих колесных парах находятся в пределах $0,5\text{--}0,8 \text{ м/с}^2$. Подвешивание эффективно фильтрует эти колебания, поскольку они носят преимущественно высокочастотный импульсный характер, далекий от собственных частот кузова. В результате поперечные ускорения кузова составляют $0,06\text{--}0,18 \text{ м/с}^2$ — устойчиво ниже нормативного предела.

При колее 1522–1524 мм контакт гребня становится нерегулярным, величина направляющих усилий снижается. Колесные пары переходят в режим квазисвободного виляния с периодическими импульсными контактами с рельсом. Поперечные ускорения букс возрастают до $0,8\text{--}1,1 \text{ м/с}^2$. Характер колебаний становится широкополосным — появляются низкочастотные компоненты, они близки к собственным частотам поперечных колебаний кузова. Эти колебания подвешивание фильтрует значительно хуже. Ускорения кузова достигают $0,18\text{--}0,26 \text{ м/с}^2$, превышая нормативные значения уже при скоростях 50 км/ч.

При колее 1525–1530 мм направляющие усилия практически исчезают. Колесные пары виляют свободно, поперечные ускорения букс ненабегающих колесных пар достигают $1,0\text{--}1,5\text{ м/с}^2$. Ускорения кузова устанавливаются на уровне $0,22\text{--}0,34\text{ м/с}^2$, превышая норму.

При колее свыше 1531 мм контакт гребня с рельсом полностью отсутствует — направляющие усилия равны нулю на всех колесных парах и при всех скоростях. Рельсовая колея в этих условиях утрачивает функцию направления экипажа. Ускорения кузова определяются стохастическим процессом виляния и составляют $0,25\text{--}0,36\text{ м/с}^2$.

Результаты теоретических исследований полностью совпадают с экспериментальными, которые показали, что при скоростях свыше 50 км/ч на путях с шириной колеи в пределах формально допустимых значений (1522–1528 мм) возникало резкое увеличение амплитуды колебаний [4]. При данной ширине колеи рельсовый путь объективно не обеспечивает направления экипажа, а подвешивание трамвая «Витязь-М» не рассчитано на гашение низкочастотных поперечных колебаний большой амплитуды.

Результаты теоретических исследований показали, что уменьшение ширины колеи до 1520 мм улучшает условия взаимодействия пути и подвижного состава трамвая по ряду критериев:

1. **Комфорт.** Поперечные ускорения крайних секций кузова не превышают $0,18\text{ м/с}^2$ при скоростях до 70 км/ч для всех четырех комбинаций условий (табл. 3), что обеспечивает соблюдение нормы $0,2\text{ м/с}^2$ с запасом не менее 10 %.

2. **Безопасность.** Направляющие усилия составляют 25–90 Н на каждой колесной паре, что обеспечивает устойчивое направление экипажа без риска вползания (предельные усилия по формуле Надаля для данной осевой нагрузки значительно выше).

3. **Износ.** Появляются направляющие усилия, существенно меньшие, чем при колее 1518 мм, но достаточные для ограничения амплитуды виляния и предотвращения ударного характера контакта, свойственного широкой колее.

4. **Унификация.** Колея 1520 мм соответствует номиналу магистральных железных дорог и метрополитена, что создает техническую основу для перспективных систем «трамвай — поезд».

Действующий нормативный допуск на ширину колеи $1524 +12\text{--}4\text{ мм}$ [7, 8] определяет диапазон ширины колеи от 1520 до 1536 мм. Данный диапазон не соответствует требованиям скоростного движения по следующим основаниям.

При ширине колеи 1524 мм в наиболее распространенных условиях (рельс Р65, подуклонка 1:20) санитарная норма по поперечным ускорениям превышает уже при скорости 50 км/ч ($0,24\text{ м/с}^2$ при допустимых $0,2\text{ м/с}^2$).

При верхней границе допуска (1536 мм) все направляющие усилия равны нулю — рельсовая колея полностью утрачивает направляющую функцию,

а поперечные ускорения кузова достигают $0,316 \text{ м/с}^2$ при скорости 50 км/ч (превышение нормы на 58%).

Нижняя граница действующего допуска (1520 мм) при существующем нормировании является аварийной и подлежит немедленному исправлению, хотя именно при ней обеспечивается наилучшая динамика экипажа.

Заключение

На основе многовариантного компьютерного моделирования в программном комплексе «Универсальный механизм» исследовано влияние ширины колеи типа рельсов и подуклонки на устойчивость поперечного движения трехсекционного трамвая «Витязь-М» в диапазоне скоростей от 10 до 80 км/ч .

Получены следующие основные результаты:

1. Ширина колеи является определяющим фактором поперечной устойчивости трамвая при скоростях 50 км/ч и выше. Ширина колеи задает зазор между гребнем колеса и рабочей гранью рельса, который определяет амплитуду свободного виляния колесной пары и наличие либо отсутствие направляющей функции рельсовой колеи. При узкой колее ($1518\text{--}1521 \text{ мм}$) рельсовая колея активно направляет экипаж, при колее свыше 1530 мм полностью утрачивает эту функцию.

2. Переход с ширины колеи 1524 мм на 1520 мм обеспечивает снижение среднеквадратических значений поперечных ускорений кузова крайних секций на $34\text{--}44\%$ в диапазоне скоростей от 50 до 70 км/ч . При колее 1520 мм все значения ускорений в данном скоростном диапазоне соответствуют нормативному пределу $0,2 \text{ м/с}^2$, согласно СП 2.5.3650-20, тогда как при 1524 мм наблюдается систематическое превышение.

3. Крайние (поворотные) секции являются лимитирующими по критерию комфорта пассажиров: уровень поперечных ускорений на них на $20\text{--}35\%$ выше, чем на средней (неповоротной) секции, что обусловлено поворотной степенью свободы крайних тележек.

4. При ширине колеи 1524 мм и выше рельсы практически не выполняют функции направления экипажа, тогда как при колее 1520 мм обеспечивается устойчивое направление при умеренном уровне износа.

5. Ненабегающие (задние в тележках) колесные пары являются наиболее динамически нагруженными: их ускорения в $1,5\text{--}2,5$ раза превышают ускорения набегающих колесных пар. Критической является КП 6 — ненабегающая колесная пара задней поворотной тележки, испытывающая эффект хлыста со значительными ускорениями (до $2,3 \text{ м/с}^2$ при 80 км/ч) при широкой колее.

6. Действующий нормативный допуск $1524 (+12\text{--}4) \text{ мм}$ не соответствует требованиям скоростного движения: при нормативной ширине колеи поперечные ускорения кузова превышают санитарную норму уже при 50 км/ч , а при верхней границе допуска (1536 мм) — на 58% .

7. Обоснована целесообразность перехода на ширину колеи 1520 мм для вновь строящихся и реконструируемых линий скоростного трамвая.

Список источников

1. Энгельскирхен М., Кох Г. Городской рельсовый транспорт — концепция и реализация // «Железные дороги мира», 2009, № 11. С. 29–36
2. Дудкин Е. П., Хомяков Я. С. Проблемы развития скоростного трамвая и пути их решения на основе совершенствования норм устройства и содержания путевой инфраструктуры // VI Национальная научно-практическая конференция с международным участием «Путь XXI века»: материалы конференции (Санкт Петербург, 4–5 декабря 2025 года). СПб.: ПГУПС, 2025.
3. СП 2.5.3650-20. Санитарно-эпидемиологические требования к отдельным видам транспорта и объектам транспортной инфраструктуры.
4. Дудкин Е. П., Козлов Д. В., Хомяков Я. С. Экспериментальные исследования колебаний трамвая «Витязь-М» // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2022. Т. 19, вып. 4. С. 775–782. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-775-782
5. Певзнер В. О., Петропавловская И. Б. Унификация ширины колеи на Российских железных дорогах: история и результаты // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2010. № 2. С. 15–19.
6. Рябонович Е. С. Опыт эксплуатации пути с суженной колеей // Метрострой. № 1–2. 1963.
7. СП 98.13330.2018. Трамвайные и троллейбусные линии. СНиП 2.05.09-90 (с изменениями № 1, 2, 3).
8. Правила технической эксплуатации трамвая: распоряжение Минтранса России от 30.11.2001 № АН-103-р.
9. Вагон трамвайный модели 71-931М: руководство по эксплуатации / ПК Транспортные системы. М., 2017. 128 с.
10. Дудкин Е. П., Хомяков Я. С., Зайцев А. А. Разработка и обоснование математической модели исследования колебаний трамвая // Бюллетень результатов научных исследований. 2025. Вып. 4. С. 100–116. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-100-116
11. ГОСТ Р 51685-2022. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия.
12. ГОСТ Р 55941-2014. Рельсы трамвайные желобчатые. Технические условия.
13. Предварительный национальный стандарт Российской Федерации. Вагоны грузовые. Расчетные неровности железнодорожного пути для оценки показателей динамических качеств грузовых вагонов расчетными методами. ПНСТ 511-2020.

Дата поступления: 12.06.2026

Решение о публикации: 19.07.2026

Информация об авторах:

ДУДКИН Евгений Павлович — доктор техн. наук, профессор; ed@pgups-tempus.ru

ХОМЯКОВ Ярослав Сергеевич — аспирант; jaro97@mail.ru

The Impact of Track Gauge on the Stability of the Tram with Increasing Speed

E. P. Dudkin, Ya. S. Khomyakov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

For citation: Dudkin E. P., Khomyakov Ya. S. The Impact of Track Gauge on the Stability of the Tram with Increasing Speed // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 3, pp. 78–92. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-78-92 (In Russian)

Abstract

Objective: to substantiate the track gauge for straight sections of tram lines, taking into account the type of rails and inclines, ensuring stability at increasing speeds to meet the development prospects of urban rail transport. **Methods:** multivariate computer simulation was performed using a specially developed model of the most widely used three-section tram “Vityaz-M” in the Universal Mechanism software package. The simulation varied the track gauge (from 1518 to 1538 mm), rail type (R65 railway rails and RT60 grooved tram rails), inclination (1:20 and 0), and travel speed (10–80 km/h). The lateral acceleration of the body and unsprung masses, as well as the guiding forces in the approaching wheel pairs, were analyzed. **Results:** it was found that at speed up to 40 km/h a track gauge in the range of 1518–1538 mm does not significantly affect the lateral acceleration of the body remaining below the standard limit of 0.2 m/s². As speed increases to 50–70 km/h, changing the gauge from 1524 mm to 1520 mm reduces lateral acceleration of the outer section body by 34–44 % depending on the rail type and inclination, while the total guiding forces increase by 30–50 % ensuring the guiding function of the track gauge. Further narrowing the track gauge to 1518 mm provides a slight additional acceleration benefit, but is accompanied by an increase in guiding forces to values that cause increased wear and increases the risk of wheel set seizure. **Practical significance:** the feasibility of switching to a standard track gauge of 1520 mm for newly constructed and reconstructed high-speed tram lines is substantiated. Switching to a 1520 mm track gauge will improve ride stability, passenger comfort, and reduce lateral wear of the rails and wheel flanges.

Keywords: tram, track width, motion stability, transverse vibrations, guiding forces, incline, R65 rail, RT60 rail, universal mechanism

References

1. Engel'skirkhen M., Kokh G. Gorodskoj rel'sovyj transport — kontseptsiya i realizatsiya [Urban Rail Transport — Concept and Implementation], *Zheleznye dorogi mira [Railways of the World]*, 2009, no. 11, pp. 29–36. (In Russian)
2. Dudkin E. P., Khomyakov Ya. S. VI Natsional'naya nauchno-prakticheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem “Put' XXI veka”: materialy konferentsii, Sankt Peterburg, 4–5 dekabrya 2025 goda [VI National Scientific and Practical Conference with International Participation “The Way of the 21st Century”: Conference Proceedings, St. Petersburg, December 4–5, 2025], St. Petersburg, Petersburg State University of Railways, 2025. (In Russian)
3. SP 2.5.3650-20. Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k otdel'nym vidam transporta i obektam transportnoj infrastruktury [Construction Regulations 2.5.3650-20. Sanitary and Epidemiological Requirements for Certain Types of Transport and Transport Infrastructure Facilities]. (In Russian)
4. Dudkin E. P., Kozlov D. V., Khomyakov Ya. S. Eksperimentalnye issledovaniya kolebanij tramvaya “Vityaz'-M” [Experimental Studies of Vibrations of the “Vityaz-M” Tram], *Izvestiya*

Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya [Proceedings of Petersburg State Transport University], St. Petersburg, Petersburg State Transport University, 2022, vol. 19, iss. 4, pp. 775–782. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-775-782 (In Russian)

5. Pevzner V. O., Petropavlovskaya I. B. Unifikatsiya shiriny kolei na Rossijskikh zheleznih dorogah: istoriya i rezultaty [Unification of Track Gauge on Russian Railways: History and Results], *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta [Bulletin of the Railway Research Institute]*, 2010, no. 2, pp. 15–19. (In Russian)

6. Ryabonovich E. S. Opyt ekspluatatsii puti s suzhenoj koleej [Experience in Operating Tracks with Narrow Gauge], *Metrostroj*, 1963, no. 1–2. (In Russian)

7. SP 98.13330.2018. Tramvajnye i trolejbusnye linii. SNiP 2.05.09-90, s izmeneniyami no. 1, 2, 3 [Construction Regulations 98.13330.2018. Tramway and Trolleybus Lines. SNiP 2.05.09-90, with Amendments no. 1, 2, 3]. (In Russian)

8. Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii tramvaya: rasporyazhenie Mintransa Rossii ot 30.11.2001 № AN-103-r [Rules of Technical Operation of the Tram: Decree of the Ministry of Transport of Russia, dated November 30, 2001, no. AN-103-r]. (In Russian)

9. Vagon tramvajnyj modeli 71-931M. Rukovodstvo po ekspluatatsii [Tram Car Model 71-931M. Operation Manual], PK Transportnye Sistemy [PC Transport Systems], Moscow, 2017, 128 p. (In Russian)

10. Dudkin E. P., Khomyakov Ya. S., Zaitsev A. A. Razrabotka i obosnovanie matematicheskoy modeli issledovaniya kolebanij tramvaya [Development and Justification of a Mathematical Model for Studying Tram Vibrations], *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovanij [Bulletin of Research Results]*, 2025, iss. 4, pp. 100–116. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-100-116 (In Russian)

11. GOST R 51685-2022 Relsy zheleznodorozhnye. Obshchie tekhnicheskie usloviya [GOST R 51685-2022 Railway Rails. General Technical Specifications]. (In Russian)

12. GOST R 55941-2014 Relsy tramvajnye zhelobchatye. Tekhnicheskie usloviya [GOST R 55941-2014 Grooved Tram Rails. Technical Specifications]. (In Russian)

13. Predvaritel'nyj nacionalnyj standart Rossijskoj Federacii. Vagony gruzovye. Raschetnye nerovnosti zheleznodorozhnogo puti dlya ocenki pokazatelej dinamicheskikh kachestv gruzovyh vagonov raschetnymi metodami. PNST 511-2020 [Preliminary National Standard of the Russian Federation. Freight Cars. Calculated Irregularities of Railway Track for Assessing Dynamic Quality Indicators of Freight Cars Using Calculation Methods. PNST 511-2020]. (In Russian)

Received: June 12, 2026

Accepted: July 19, 2026

Author's information:

Evgeny P. DUDKIN — Dr. Sci. in Engineering, Professor; ed@pgups-tempus.ru

Yaroslav S. KHOMYAKOV — Postgraduate Student; jaro97@mail.ru

УДК 625.723

Имитационная математическая модель функционирования участка дороги для промышленного транспорта

С. В. Кириллов

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

Для цитирования: Кириллов С. В. Имитационная математическая модель функционирования участка дороги для промышленного транспорта // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 3. С. 93–102. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-93-102

Аннотация

Цель: прогнозирование режимов движения транспортных потоков по построенным участкам дорог для промышленного транспорта, чтобы осуществлять анализ процессов их функционирования, получать оценки выходных параметров различных предлагаемых вариантов технических решений и сравнивать их между собой. Но конечной целью проектирования является получение наилучшего технического решения из числа возможных альтернатив, которое обеспечило бы высокие показатели эффективности и качества создаваемого объекта. **Методы:** сравнение между собой предлагаемых вариантов технических решений и выбор наилучшего. **Результаты:** в статье представлена экспериментальная факторная модель. В ее основу положены зависимости оценки скорости движения машин в колонне от приоритетных факторов: ограничивающей ширины проезжей части, радиуса горизонтальной кривой малого радиуса и продольного уклона. **Практическая значимость:** результаты расчетов позволят разработать специальные номограммы для прогнозирования скорости движения потока по построенному участку.

Ключевые слова: рациональная ширина дорожного покрытия, дороги для промышленного транспорта, имитационная математическая модель, расчетные транспортные потоки, ограничивающая ширина проезжей части, радиус горизонтальной кривой малого радиуса, продольный уклон

Введение

Для дорог промышленного транспорта современные зарубежные исследования делают акцент на комплексном подходе: не просто моделировать поток машин, а встраивать его в экосистему промышленного предприятия, учитывая технологические процессы, приоритеты и риски, что дает более точные результаты. Это детализация потоков на уровне отдельных автомобилей или групп (PTV Vissim), интеграция с логистикой (AnyLogic), сценарии и оптимизация (внедрение динамического распределения потоков), а также учет неопределенности (TRANSIMS — система для транспортного анализа, разработанная Лос-Аламосской национальной лабораторией в США). Получение результатов исследования с применением таких моделей требует больших затрат на сбор данных для калибровки модели, проведения статистического анализа и сравнения выборок, мощных компьютеров и долгого времени расчета, адаптации под конкретную индустрию этой универсальной модели.

В современной системной литературе [1–3 и др.] отмечается также, что при проектировании элементов сложных технических систем наряду с обычными имитационными моделями исключительно эффективно применение экспериментальных факторных математических моделей.

Целями функционирования такой модели являются формирование множества возможных вариантов проектируемого объекта, оптимальный выбор на данном множестве рационального варианта и определение технических параметров его элементов, которые будут оптимальными. Выбор структуры и оптимизационного алгоритма требует выполнения множества итераций, количество которых может достигать, как и у современных зарубежных исследователей, чисел второго и третьего порядков при отработке только одного варианта исходных данных проектирования элементов сложной системы. Поэтому каждая проектная задача характеризуется большими затратами машинного времени и, как следствие, медленным внедрением методов функционального проектирования в практику дорожного дела. Вместе с тем без выполнения работ по функциональному проектированию невозможно обеспечить достаточный технико-эксплуатационный уровень дорог для промышленного транспорта и конкурентоспособность используемых конструкций строящихся участков этих дорог.

Построение экспериментальной факторной модели

При построении экспериментальной факторной модели объект моделирования (строящийся участок дороги для промышленного транспорта) представляется в виде черного ящика, на вход которого подаются совокупности переменных $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$, характеризующие технические параметры строящегося участка, $U(u_1, u_2, \dots, u_m)$, описывающие транспортный поток по нему, и $E(e_1, e_2, \dots, e_k)$ — факторы окружающей среды, а на выходе можно наблюдать и регистрировать переменные $Y(y_1, y_2, \dots, y_r)$. В процессе проведения эксперимента изменение переменных X , U и E приводит к изменению выходных переменных Y . В целях целенаправленной реализации модели необходимо регистрировать изменения всех ее параметров и осуществить их статистическую обработку для обоснования оптимальных значений параметров системы «строящийся участок — транспортный поток».

При проведении физического эксперимента переменными X можно управлять, изменяя их величину по заданному закону. Так, например, ширина покрытия на прямолинейных горизонтальных участках задается множеством $\{6,0; 6,25; 6,5; 6,75; 7,0; 7,25; 7,5; 7,75; 8,0; 8,25\}$. Точно так же по определенному закону в модели изменяются радиусы горизонтальных кривых, величины и протяженности продольных уклонов. Сложнее обстоит дело с моделированием неуправляемых переменных $U(u_1, u_2, \dots, u_m)$, которые в процессе функционирования дороги, как правило, принимают случайные значения. При этом значения переменных X и U

в процессе моделирования можно контролировать и регистрировать. Вместе с тем в процессе функционирования СУ-ТП на нее воздействуют неопределенные факторы окружающей среды E , которые нельзя заранее предсказывать и сложно контролировать.

Переменные X и U принято называть факторами [2]. Факторы X являются управляемыми и изменяются как детерминированные переменные, а факторы U — неуправляемые и изменяются во времени случайным образом.

Выходная переменная Y представляет собой вектор зависимых переменных моделируемого строящегося участка дороги для промышленного транспорта. Ее принято называть откликом, а зависимость Y от факторов X и U — функцией отклика [2].

Переменная E действует в процессе эксперимента бесконтрольно. Если предположить, что факторы X и U стабилизированы во времени и сохраняют постоянные значения, то под влиянием переменных E (дождь, снег, туман, гололед и др.) функция отклика Y может меняться как систематическим, так и случайным образом.

Объектами исследования в экспериментальной факторной модели функционирования строящегося участка дороги для промышленного транспорта являются разработанные теоретические модели прогнозирования движения транспортных потоков по построенным участкам дорог для промышленного транспорта (прямолинейным, горизонтальным, с горизонтальными кривыми малых радиусов, с продольными уклонами) [4].

Данные модели позволяют с достаточной степенью точности оценивать скорости движения транспортных потоков по элементам строящихся участков, пропускную способность этих участков и расход горючего расчетными автомобилями (КамАЗ-45143-50, КамАЗ-65115, КамАЗ-6520-43, КамАЗ-65201-6012-53) при движении по построенному участку.

Реализация данных теоретических моделей прогнозирования

Сложность реализации данных моделей заключается в том, что они в обязательном порядке предусматривают дифференцированный учет интенсивности движения транспортных потоков по направлениям движения. С этой целью представляется целесообразным для различных зон автомобильных дорог для промышленного транспорта установить расчетную интенсивность движения транспортных потоков в диапазоне $N = \{1000 \text{ авт./ч} — 10\,000 \text{ авт./ч}\}$ и для каждого значения расчетной интенсивности задать соотношения часовой интенсивности движения к промышленному объекту и обратно от $\{(1,0:0,0)$ до $2(0,5:0,5)\}$ 0. Результаты значений расчетной интенсивности движения по автомобильной дороге с их дифференцированием по направлениям движения представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Расчетные транспортные потоки по дорогам для промышленного транспорта

Средняя часовая интенсивность, авт./ч	Часовые интенсивности при соотношении движения к промышленному объекту и обратно, доли единиц											
	1,0:0,0		0,9:0,1		0,8:0,2		0,7:0,3		0,6:0,4		0,5:0,5	
	к пром. объекту	обратно	к пром. объекту	обратно	к пром. объекту	обратно	к пром. объекту	обратно	к пром. объекту	обратно	к пром. объекту	обратно
100	100	0	90	10	80	20	70	30	60	40	50	50
200	200	0	180	20	160	40	140	60	120	80	100	100
300	300	0	270	30	240	60	210	90	180	120	150	150
400	400	0	360	40	320	80	280	120	240	160	200	200
500	500	0	450	50	400	100	350	150	300	200	250	250
600	600	0	540	60	480	120	420	180	360	240	300	300
700	700	0	630	70	560	140	490	210	420	280	350	350
800	800	0	720	80	640	160	560	240	480	320	400	400
900	900	0	810	90	720	180	630	270	540	360	450	450
1000	1000	0	900	100	800	200	700	300	600	400	500	500

Значительную сложность в ходе исследования составила оценка распределения передвигающихся по автомобильным дорогам для промышленного транспорта колонн по численному и марочному составу. Такая задача была решена моделированием процесса формирования транспортных потоков для промышленного транспорта на примере подъездов к песчаным карьерам в районе СНТ «Пульман» Ломоносовского района Ленинградской области. Обработывая результаты данной работы и принимая усредненные значения интенсивностей движения по этим подъездам, получаем распределение по численности в них машин промышленного транспорта и остальных.

Использование при моделировании данных табл. 1 позволяет охватить весь допустимый спектр параметров транспортных потоков по дорогам для промышленного транспорта и получить оптимальные значения технических характеристик строящихся участков дорог для промышленного транспорта с учетом вероятностных характеристик транспортных потоков на них.

В качестве расчетной машины для оценки расхода горючего при движении транспортного потока по строящимся участкам дорог для промышленного транспорта в данной модели принят автомобиль КамАЗ-65115. Он наиболее ярко и полно отражает сущность современного движения и является одним из самых распространенных автомобилей в парке строительного транспорта. Оценка расхода горючего была выполнена по эмпирической зависимости вида:

$$Q_i = 97,82 + 1,42G_n + 615,27\xi + 139,35\xi G_n - 3627v_a + 0,036v_a^2 \quad (1)$$

где G_n — загруженность автомобиля, т;
 ξ — полное дорожное сопротивление;
 v_a — скорость движения автомобиля, км/ч.

Чтобы решить проблему размерности, в целевую функцию включаем не абсолютные значения Q_i , а их нормированные значения, рассчитываемые по формуле:

$$Q_i^n = \frac{Q_i}{Q_i^{\text{пр}}}, \quad (2)$$

где $Q_i^{\text{пр}}$ — предельное (директивное) или нормативное значение критерия.

Анализ показал, что в качестве нормативного значения критерия представляется целесообразным принять расход горючего автомобилем при скорости 30 км/ч, полной загрузке автомобиля и сопротивлении качению $\xi = 0,02$.

Рассматриваемый в качестве одного из важнейших критериев срок восстановления в рамках эксплуатационного содержания участка дороги для промышленного транспорта зависит от множества различных по характеру факторов (объемов работ, сил и средств дорожных подразделений, метода организации работ и способа их развертывания, погодных-климатических условий и др.) Учесть все факторы при оценке сроков восстановления в ходе реализации имитационной модели функционирования восстановленного участка — задача достаточно объемная и труднорешаемая. В связи с этим было принято решение вводить в модель только значения объемов работ по устройству дорожного покрытия, которые достаточно объективно в относительных показателях отражают сроки выполнения работ по строительству участка. В качестве нормировочного показателя приняты объемы строительства покрытия на участке с шириной проезжей части, равной 7,0 м.

Результаты объемов работ по устройству дорожного покрытия из каменных материалов (щебень, гравий, песчано-гравийная смесь и др.) на участке протяженностью 1,0 км приведены в табл. 2.

Расчет пропускной способности строящегося участка выполнялся по методике, сформулированной на основе ранее выполненных исследований [5]. В качестве нормировочного показателя принята пропускная способность полосы движения дороги, равная 300 авт./ч. Срок службы дорожных конструкций на участках дорог для промышленного транспорта рассчитывается по известной методике, приведенной в работе [6]. Нормирование показателей срока службы выполнено относительно срока, равного 30 суткам.

Укрупненная блок-схема алгоритма имитационной модели функционирования построенного участка представлена на рисунке.

ТАБЛИЦА 2. Объемы работ по устройству дорожного покрытия из каменных материалов

Ширина покрытия, м	6,0	6,25	6,5	6,75	7,0	7,25	7,5	7,75	8,0	8,25
Толщина покрытия, м	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21
Объем каменного материала, м ³	936	1056	1183	1316	1456	1602	1755	1914	2080	2252
Отношение $Q_i/Q_{7,00}$	0,643	0,725	0,812	0,904	1,0	1,1	1,205	1,314	1,428	1,547



Рисунок. Оптимизационная комплексная модель обоснования рациональных параметров строящихся участков

Наибольшую сложность при разработке модели вызвал расчет скоростей движения транспортных потоков по участкам с различной шириной проезжей части. Данные, характеризующие скорости движения потока по покрытиям различной ширины, приведены в табл. 3. Они получены с использованием компьютера для прямолинейного горизонтального участка с гравийным покрытием.

ТАБЛИЦА 3. Результаты расчетов скоростей движения потоков по дорогам для промышленного транспорта

Ширина проезжей части и скорость потока	v_a , км/ч	Интенсивность встречного движения, авт./ч							
		50	100	150	200	250	300	350	400
$b = 6,0$ м $v_{пт} = 6,32$ км/ч	10	17,4	14,8	12,2	10,4	7,0	4,4	1,8	
	20	25,5	20,1	16,5	12,0	7,5	3,0		
	40	33,3	26,6	19,9	13,2	6,5			
	50	41,0	32,1	23,2	14,3	5,3			
$b = 6,25$ м $v_{пт} = 10,56$ км/ч	10	18,5	16,9	15,4	13,8	12,3	10,7	9,2	7,6
	20	26,7	23,4	20,1	16,7	13,4	10,1	6,8	3,5
	40	34,6	29,3	23,9	18,5	13,2	7,8	2,4	
	50	42,5	35,1	27,6	20,2	12,7	5,2		
$b = 6,5$ м $v_{пт} = 15,65$ км/ч	10	19,4	18,8	18,2	17,6	16,9	16,3	15,7	15,1
	20	27,8	25,7	23,5	21,3	19,1	17,0	14,8	12,6
	40	36,0	31,9	27,9	23,9	20,2	15,8	11,8	7,7
	50	44,0	37,9	31,9	25,9	19,9	13,8	7,8	1,8
$b = 6,75$ м $v_{пт} = 21,53$ км/ч	10								
	20	29,0	27,7	26,6	25,4	24,3	23,2	22,0	20,9
	40	37,2	34,5	31,7	28,9	26,2	23,4	20,6	17,9
	50	45,4	40,8	36,2	31,7	27,0	22,5	17,9	13,3
$b = 7,0$ м $v_{пт} = 28,17$ км/ч	10								
	20	29,8	29,6	29,3	29,1	28,9	28,7	28,5	28,3
	40	38,4	36,8	35,2	33,6	32,0	30,4	28,8	27,2
	50	46,8	43,6	40,3	37,1	33,9	30,7	27,5	24,2
$b = 7,25$ м $v_{пт} = 35,52$ км/ч	10								
	20								
	40	39,5	38,9	38,4	37,8	37,3	36,7	36,2	35,6
	50	48,0	46,1	44,1	42,2	40,2	38,3	36,3	34,4
$b = 7,5$ м $v_{пт} = 43,56$ км/ч	10								
	20								
	40								
	50	49,2	48,4	47,6	46,8	46,0	45,2	44,4	43,6

Заключение

Для прогнозирования режимов движения транспортных потоков по строящимся участкам дорог для промышленного транспорта разработаны модели движения транспортных потоков по горизонтальным прямолинейным строящимся участкам, а также участкам с горизонтальными кривыми и продольными уклонами. В основу моделей положены зависимости оценки скорости движения машин в колонне от приоритетных факторов: ограничивающей ширины проезжей части, горизонтальной кривой малого радиуса и продольного уклона. Результаты расчетов позволят разработать специальные номограммы для прогнозирования скорости движения потока по восстанавливаемому участку.

Список источников

1. Абчук В. А. Экономико-математические методы: Элементарная математика и логика. Методы исследования операций. СПб.: Союз, 1999. 320 с.
2. Экономико-математические методы и прикладные модели / под ред. В. В. Федосеева. М.: ЮНИТИ, 1999.
3. Мицель А. А. Математическое и имитационное моделирование экономических процессов. Томск: Изд-во ТУСУР, 2019. 193 с.
4. Экономико-математические методы и модели / под ред. А. В. Кузнецова. Минск: БГЭУ, 2000.
5. Кириллов С. В., Романов Н. Н. Совершенствование методологии обоснования геометрических характеристик восстанавливаемых участков автомобильных дорог // Техно-технологические проблемы сервиса. 2019. № 4 (50). С. 16–19.
6. Кириллов С. В., Романов Н. Н. Сущность и содержание понятия пропускной способности автомобильных и военно-автомобильных дорог // БАТТ: межвузовский сборник научных трудов, труды кафедры. Вып. 1. СПб., 2000.
7. СП 37.13330.2012. Промышленный транспорт. Актуализированная редакция СНиП 2.05.07-91*. М.: Минрегион России, 2013.
8. СП 78.13330.2012. Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 3.06.03-85. М.: Минрегион России, 2013.
9. Технология и организация строительства дорог промышленного транспорта: методические указания к выполнению практических заданий и курсового проекта / сост. А. А. Логвиненко. Белгород: Изд-во БГТУ, 2014. 45 с.
10. Строительство автомобильных дорог промышленного транспорта: методические указания к выполнению лабораторных работ / сост. А. А. Логвиненко. Белгород: Изд-во БГТУ, 2014. 48 с.

Дата поступления: 25.06.2026

Решение о публикации: 08.08.2026

Контактная информация:

КИРИЛЛОВ Сергей Васильевич — кандидат техн. наук, доцент; Kirillov@pgups.ru

A Simulation Mathematical Model of the Operation of a Road Section for Industrial Transport

S. V. Kirillov

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

For citation: Kirillov S. V. A Simulation Mathematical Model of the Operation of a Road Section for Industrial Transport // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 3, pp. 93–102. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-93-102 (In Russian)

Abstract

Objective: to forecast traffic flow patterns along constructed road sections for industrial transport in order to analyze their operation processes, obtain estimates of the output parameters of various proposed technical solutions, and compare them. The ultimate goal of designing roads for industrial transport is to select the best technical solution from among possible alternatives, ensuring high efficiency and quality of the constructed facility. **Methods:** the study utilizes a comparative analysis framework and parametric modeling to evaluate and select the optimal engineering solution from a set of alternatives. **Results:** the article presents an experimental factor model. It is based on the dependence of vehicle convoy speed estimates on priority factors: the limiting width of the roadway, the radius of the small-radius horizontal curve, and the longitudinal slope. **Practical significance:** the calculation results allowed the development of specialized nomograms for predicting the flow speed along the constructed section.

Keywords: rational pavement width, roads for industrial transport, simulation mathematical model, calculated traffic flows, limiting width of the roadway, the radius of the small-radius horizontal curve, longitudinal slope

References

1. Abchuk V. A. Ekonomiko-matematicheskie metody: Elementarnaya matematika i logika. Metody issledovaniya operatsiy [Economic and Mathematical Methods: Elementary Mathematics and Logic. Operations Research Methods], St. Petersburg, Soyuz, 1999, 320 p. (In Russian)
2. Ekonomiko-matematicheskie metody i prikladnye modeli [Economic and Mathematical Methods and Applied Models], ed. by V. V. Fedoseev, Moscow, YUNITI, 1999. (In Russian)
3. Mitsel' A. A. Matematicheskoe i imitatsionnoe modelirovanie ekonomicheskikh protsessov [Mathematical and Simulation Modeling of Economic Processes], Tomsk, TUSUR, 2019, 193 p. (In Russian)
4. Ekonomiko-matematicheskie metody i modeli [Economic and Mathematical Methods and Models], ed. by A. V. Kuznetsov, Minsk, BSEU [Belarusian State University of Economics], 2000. (In Russian)
5. Kirillov S. V., Romanov N. N. Sovershenstvovanie metodologii obosnovaniya geometricheskikh kharakteristik vosstanavlivaemykh uchastkov avtomobilnykh dorog [Improving the Methodology for Justifying the Geometric Characteristics of Restored Sections of Highways], *Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa [Technical and Technological Problems of Service]*, 2019, no. 4 (50), pp. 16–19. (In Russian)

6. Kirillov S. V., Romanov N. N. Sushchnost' i sodержanie ponyatiya propusknoj sposobnosti avtomobil'nyh i voenno-avtomobil'nyh dorog [The Essence and Content of the Concept of Traffic Capacity of Highways and Military Roads], *VATT: mezhvuzovskij sbornik nauchnykh trudov, trudy kafedry* [VATT: Interuniversity Collection of Scientific Papers, Department Proceedings], iss. 1, St. Petersburg, 2000. (In Russian)
7. SP 37.13330.2012. Promyshlennyj transport. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.05.07-91* [Construction Regulations 37.13330.2012. Industrial transport. Updated version of SNiP 2.05.07-91*], Moscow, Minregion Rossii [Ministry of Regional Development of the Russian Federation], 2013. (In Russian)
8. SP 78.13330.2012. Avtomobil'nye dorogi. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 3.06.03-85 [SP 78.13330.2012. Highways. Updated version of SNiP 3.06.03-85]. Moscow, Minregion Rossii [Ministry of Regional Development of the Russian Federation], 2013. (In Russian)
9. Tekhnologiya i organizatsiya stroitel'stva dorog promyshlennogo transporta: metod. ukaz. k vypolneniyu prakticheskikh zadaniy i kursovogo proekta / sost. A. A. Logvinenko [Technology and Organization of Industrial Transport Road Construction: Guidelines for Practical Assignments and Course Projects, compiled by A.A. Logvinenko], Belgorod, BSTU [Bryansk State Technical University], 2014, 45 p. (In Russian)
10. Stroitel'stvo avtomobil'nykh dorog promyshlennogo transporta: metodicheskie ukazaniya k vypolneniyu laboratornykh rabot, sost. A. A. Logvinenko [Construction of Industrial Transport Highways: Guidelines for Laboratory Work, compiled by A.A. Logvinenko], Belgorod, BSTU [Bryansk State Technical University], 2014, 48 p. (In Russian)

Received: June 25, 2026

Accepted: August 08, 2026

Author's information:

Sergey V. KIRILLOV — PhD in Engineering, Associate Professor; Kirillov@pgups.ru

УДК 629.3.017

Многокритериальная оптимизация распределения ресурсов в резервированных комплексах транспортно-технологических машин

М. А. Платонова

Воронежский институт высоких технологий, Россия, 394043, Воронеж, ул. Ленина, 73а

Для цитирования: Платонова М. А. Многокритериальная оптимизация распределения ресурсов в резервированных комплексах транспортно-технологических машин // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 3. С. 103–115. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-103-115

Аннотация

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения надежности и эффективности функционирования логистических транспортных систем в условиях нестабильного грузопотока и возрастающих требований к бесперебойности доставки. Резервирование комплексов машин и агрегатов является одним из ключевых механизмов обеспечения заданного уровня надежности, однако существующие подходы к управлению резервами не учитывают многокритериальность задачи, что приводит к неоправданному увеличению затрат или снижению эксплуатационной надежности. **Цель:** разработка математической постановки задачи многокритериальной оптимизации распределения ресурсов в резервированных комплексах транспортно-технологических машин и обоснование метода ее решения. **Методы:** исследование базируется на методах теорий массового обслуживания, надежности технических систем, многокритериальной оптимизации и имитационного моделирования. В работе использованы подходы векторной оптимизации с построением множества Парето-оптимальных решений. **Результаты:** представлена формализованная постановка задачи векторной оптимизации резервированных комплексов машин с учетом структурной и временной избыточности. Приведена система критериев эффективности, охватывающая экономические, надежность и эксплуатационные показатели. Раскрыт алгоритм поиска оптимальных решений на основе метода взвешенных сумм и генетического алгоритма, обоснованы результаты апробации разработанного подхода на примере погрузочно-разгрузочного комплекса контейнерного терминала. Теоретическая значимость заключается в развитии методологии управления резервированными техническими системами в логистике за счет учета многокритериального характера задачи оптимизации. **Практическая значимость:** возможность применения разработанного подхода для обоснования состава парка транспортно-технологических машин и оптимизации режимов их резервирования на предприятиях различных отраслей. Выявлен ряд ограничений (статический характер модели, упрощенное представление отказов, неучет взаимосвязей между машинами), требующих дальнейшего изучения, представлены направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: логистические транспортные системы, транспортно-технологические системы, резервированные комплексы машин, многокритериальная оптимизация, теория надежности, Парето-оптимальность

Введение

Современные логистические транспортные системы (ЛТС) характеризуются высокой степенью технической оснащенности и сложностью процессов взаимодействия различных видов транспорта и технологического оборудования [1, 2]. Одним из ключевых факторов, определяющих эффективность функционирования

ЛТС, является надежность работы транспортно-технологических машин (ТТМ): погрузчиков, кранов, тягачей, конвейерных систем и других агрегатов, обеспечивающих непрерывность грузопотока [3, 4]. На железнодорожном транспорте он зависит от трех ключевых факторов, в которых ТТМ играют решающую роль:

1. Решение (как минимум уменьшение) проблем задержки при перегрузке грузов между видами транспорта (железнодорожный ↔ автомобильный, морской, речной), что может привести к простоям и нарушению цепочки поставок.

2. Неравномерное движение поездов, что приводит к простоям на станциях, заторам и нарушению графика.

3. Ручное управление грузопотоком влечет ошибки, потерю времени и низкую эффективность.

В условиях нестационарного спроса на логистические услуги, сезонных колебаний грузопотоков и неизбежных отказов техники особую значимость приобретает задача рационального резервирования машин и агрегатов [5–7]. Резервирование, нередко подразумевающее установку дополнительных элементов и требующее дополнительных капитальных вложений, позволяет тем не менее исключить незапланированные простои от поломок машин и агрегатов. При этом чрезмерное резервирование также нежелательно, вследствие чего требуется найти оптимальное соотношение между показателями надежности машины (агрегата) и затратами на ее (его) создание.

Исследование современной научной литературы в данной области позволило выявить ряд ограничений по управлению резервированными комплексами машин. В частности, использование лишь одного критерия (минимизация затрат или максимум надежности [8–10]) не приводит к желательному для перевозчика результату, а применение множества критериев [11] требует создания соответствующего программного обеспечения, позволяющего выявлять оптимальные решения. При этом классическая теория надежности [12–14] фактически игнорирует экономические аспекты формирования различных схем резервирования машины и агрегатов. В работах по логистике [15–18] акцент делается на управлении материальными потоками, тогда как техническая составляющая (резервирование машин) рассматривается фрагментарно.

Зарубежные исследования [19–22] демонстрируют применение методов оптимизации (в том числе многокритериальной) для управления производственными системами. В частности, в [21] отмечается необходимость оптимизации внутризаводских логистических процессов с использованием инструментов цифрового моделирования, а в [22] рассматривается оптимизация внутрикорпоративных перевозок с акцентом на снижение транспортных расходов и повышение эффективности логистических процессов. При этом авторами отмечается недостаточная исследованность вопросов учета структурной и временной избыточности при резервировании ТТМ.

Таким образом, научная проблема, решаемая в рамках данного исследования, заключается в отказе от формализованного подхода к многокритериальной оптимизации распределения ресурсов в резервированных комплексах транспортно-технологических машин, учете как экономических, так и надежно-эксплуатационных показателей, поэтому исследования в данной области являются актуальными.

Целью исследования является разработка математической постановки задачи многокритериальной оптимизации распределения ресурсов в резервированных комплексах транспортно-технологических машин и обоснование метода ее решения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить формализацию структуры резервированного комплекса ТТМ и определить основные параметры управления;
- разработать систему критериев для оценки эффективности функционирования резервированного комплекса;
- построить математическую модель задачи многокритериальной оптимизации распределения ресурсов;
- предложить метод решения задачи и выполнить его апробацию на тестовом примере.

Методы и материалы

Методологическая база исследования базируется на методах теории массового обслуживания, а также на надежности технических систем, многокритериальной оптимизации и имитационного моделирования. В работе использованы подходы векторной оптимизации с построением множества Парето-оптимальных решений. В исследовании применялся метод формализации структуры резервированного комплекса транспортно-технологических машин, выполняющих однородные операции по обработке производственного звена грузопотока на операциях погрузки, разгрузки и перемещения. Предусматривался поиск резервных ТТМ в рабочем состоянии и готовых к немедленному включению (горячий резерв) или в нерабочем состоянии и требующих времени на запуск (холодный резерв), а также распределение ТТМ между несколькими технологическими участками (скользящий резерв).

Результаты

В качестве критериев эффективности функционирования резервированного комплекса ТТМ были приняты показатели минимизации совокупных затрат $C_{\text{ТТМ}}$ (экономический критерий, определяемый с учетом пропорциональных n капитальных затрат $C_{\text{кап}}$ на приобретение машин, а также эксплуатационных затрат $C_{\text{экспл}}$, зависящих от режима использования ТТМ), надежности структуры резервированного комплекса (максимизация коэффициента готовности K_r или вероятности

безотказной работы $P(t)$ за заданный период), минимизации среднего времени ожидания обслуживания $T_{ож}$ (эксплуатационный критерий). Ограничения при оптимизации включали в себя минимально допустимый уровень производительности $P_{ТТМ}$ применяемых машин (рис. 1).

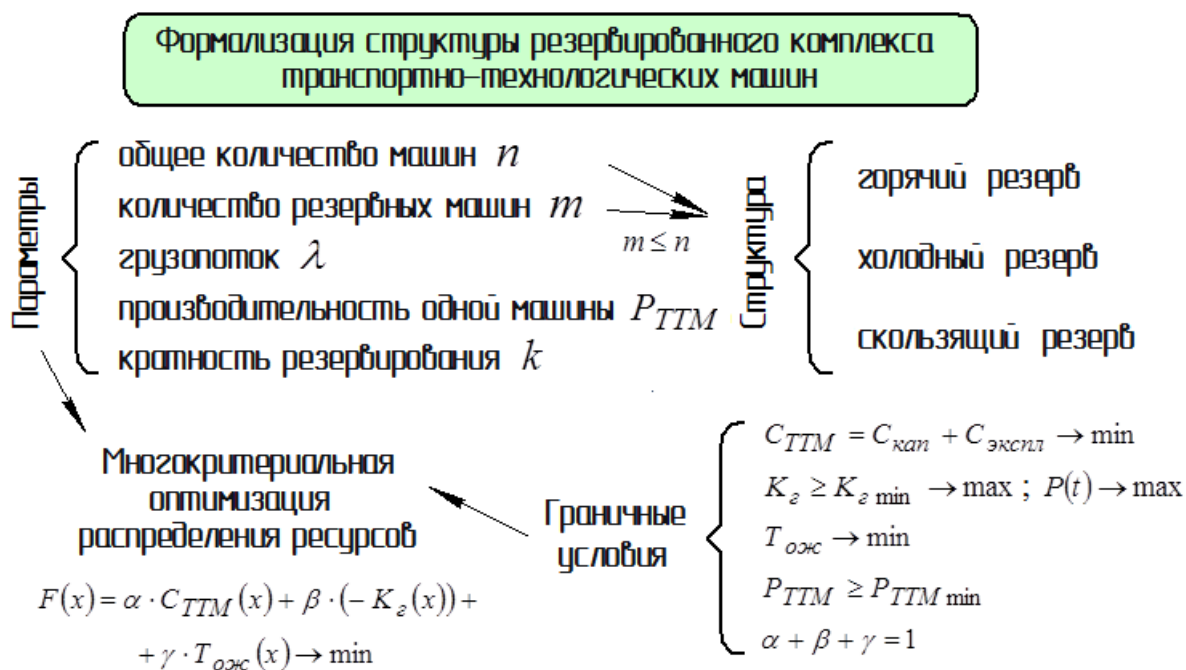


Рис. 1. Формализация структуры резервированного комплекса транспортно-технологических машин

Для решения многокритериальной задачи по оптимизации распределения ресурсов в резервированных комплексах ТТМ использовался комбинированный подход, включающий в себя предварительную оценку области допустимых решений:

$$F(x) = \alpha \cdot C_{ТТМ}(x) + \beta \cdot (-K_z(x)) + \gamma \cdot T_{ож}(x) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где α, β, γ — весовые коэффициенты;

$x = (n, m, S)$ — вектор управляемых переменных (общее количество машин n , количество резервных машин m , схема резервирования S), при этом для области X допустимых решений, определяемых технологическими и ресурсными ограничениями, $x \in X$.

Кроме того, применялся анализ Парето-фронта для выбора рациональных решений с учетом предпочтений ЛПР (лиц, принимающих решения).

В результате проведенного анализа разработана формализованная постановка задачи многокритериальной оптимизации резервированных комплексов транспортно-технологических машин. Отличительными особенностями предложенной постановки являются:

- учет как структурной (количество резервных машин), так и временной (горячий/холодный резерв) избыточности;
- использование трех групп критериев (экономические, надежности, эксплуатационные);
- возможность учета ограничений различной природы.

Апробация разработанного подхода была выполнена на примере погрузочно-разгрузочного комплекса контейнерного терминала, для чего были приняты следующие исходные данные:

- минимально необходимое количество машин для обработки грузопотока: $n_{\min} = 4$;
- интенсивность поступления требований (грузопоток): $\lambda = 3$ ед./ч;
- производительность одной машины: $P_{\text{ТТМ}} = 1$ ед./ч;
- стоимость одной машины: $C_{\text{ед}} = 5$ млн руб.; эксплуатационные затраты на одну машину: $C_{\text{экспл ед}} = 1$ млн руб./год.

Результаты расчета Парето-оптимальных решений представлены в табл. 1 и на рис. 2.

ТАБЛИЦА 1. Парето-оптимальные решения для погрузочно-разгрузочного комплекса

n	m	Схема резервирования	$C_{\text{ТТМ}}$, млн руб.	K_r	$T_{\text{ож}}$, ч
4	0	Без резерва	20	0,82	0,45
5	1	Горячий резерв	25	0,93	0,18
6	2	Горячий резерв	30	0,97	0,09
5	1	Холодный резерв	25	0,89	0,22
4	1	Скользкий резерв	22	0,88	0,31

Анализ полученных результатов позволяет отметить, что компромисс между затратами на формирование резервированного комплекса транспортно-технологических машин и надежностью указанного комплекса проявляется в виде нелинейной зависимости: при увеличении затрат с 20 до 25 млн руб. (на 25 %) надежность возрастает с 0,82 до 0,93 (на 13,4 %), а при дальнейшем росте затрат до 30 млн руб. надежность увеличивается лишь до 0,97 (на 4,3 %). Это свидетельствует о наличии области насыщения, когда дополнительные вложения в резервирование дают все меньший прирост надежности.

Сравнение схем резервирования позволило выявить, что при одинаковом количестве ТТМ ($n = 5$, $m = 1$) более высокая степень надежности машин и агрегатов (на 4,49 %) обеспечивается горячим резервированием при меньшем (на 18,2 %) времени ожидания, однако при этом требуются дополнительные затраты на поддержание резервной машины в постоянной готовности к работе.

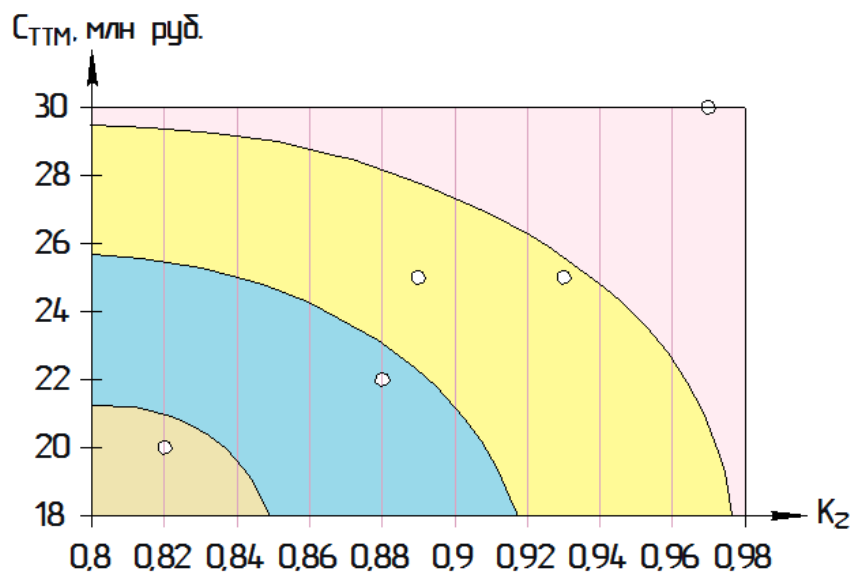


Рис. 2. Парето-фронт для резервированного комплекса ТТМ

При скользящем резервировании (общее количество машин $n = 4$, одна из них перераспределяется между участками) надежность системы по сравнению с базовым вариантом выше на 7,3 %, однако совокупные затраты С_{ТТМ} также выше (на 10 %), а время ожидания (по сравнению с вариантом 2: горячий резерв, $n = 5$) возрастает на 31 %. Тем не менее подобная схема может быть рекомендована для складских терминалов с разнородными операциями и возможностями для временного перераспределения машин и агрегатов.

В целом отметим, что качественные и количественные показатели работы конкретного логистического терминала (в том числе требования ко времени реакции на отказы машин и агрегатов) обуславливают выбор конкретной схемы резервирования.

Результаты сравнения разработанного подхода по распределению материальных ресурсов с традиционными методами однокритериальной оптимизации по минимуму затрат при фиксированном уровне надежности представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Сравнение результатов оптимизации различными методами

Метод	n	m, S	$C_{\text{ТТМ}}$, млн руб.	K_r	$T_{\text{ож}}$, ч	Примечание
Однокритериальная (min $C_{\text{ТТМ}}$ при $K_r \geq 0,9$)	5	1 (горячий)	25	0,93	0,18	Фиксированный порог надежности
Однокритериальная (max K_r при $C_{\text{ТТМ}} \leq 25$)	5	1 (горячий)	25	0,89	0,22	Фиксированный бюджет
Многокритериальная (Парето)	Множество решений	—	—	—	—	Учет компромиссов

Как видно из табл. 2, однокритериальные подходы дают единственное решение, которое может оказаться неоптимальным с точки зрения других критериев. В частности, при фиксированном бюджете 25 млн руб. возможны два решения: горячий резерв ($n = 5, m = 1$) и холодный резерв ($n = 5, m = 1$) с различными показателями надежности и времени ожидания. Выбор между ними требует учета дополнительных факторов, не формализуемых в рамках однокритериальной постановки.

Разработанный многокритериальный подход позволяет ЛПР осознанно выбирать компромиссное решение с учетом приоритетов предприятия (например, приоритет надежности над затратами для критически важных операций). В целом предложенная методология позволяет снизить эксплуатационные затраты на 10–20% при сохранении заданного уровня надежности или повысить надежность на 5–15% при неизменном бюджете.

Полученные результаты подтверждают необходимость применения многокритериального подхода к оптимизации резервированных комплексов транспортно-технологических машин. Это согласуется с выводами зарубежных исследователей [20, 21] о том, что учет множества критериев позволяет получить более гибкие и адаптируемые решения по сравнению с классическими однокритериальными методами.

Вместе с тем в ходе исследования выявлен ряд ограничений, требующих дальнейшего изучения:

1. Статический характер модели. В предложенной постановке параметры грузопотока (λ) и производительности машин ($P_{\text{ТТМ}}$) предполагаются постоянными. В реальных условиях они подвержены стохастическим колебаниям, что требует перехода к динамическим моделям.

2. Упрощенное представление отказов. Принято предположение об экспоненциальном законе распределения наработки на отказ. Для некоторых типов ТТМ (например, оборудование с интенсивным износом) более адекватными могут быть распределения Вейбулла или логарифмически нормальное распределение.

3. Неучет взаимосвязей между машинами. В реальных логистических системах машины могут быть связаны технологически (например, последовательное выполнение операций), что накладывает дополнительные ограничения на схемы резервирования.

4. Сложность верификации на реальных данных. Апробация выполнена на условном примере. Для подтверждения практической значимости требуется проведение более масштабных вычислительных экспериментов с использованием данных реальных предприятий.

С учетом вышеизложенного направления дальнейших исследований включают:

- разработку динамической модели многокритериальной оптимизации с учетом нестационарного грузопотока;

- адаптацию методов машинного обучения для прогнозирования отказов оборудования;
- создание программного комплекса для поддержки принятия решений при управлении резервированными комплексами ТТМ;
- интеграцию разработанного подхода с системами управления логистическими процессами (WMS, TMS).

Заключение

В результате проведенного исследования получены следующие основные результаты:

1. Разработана формализованная постановка задачи многокритериальной оптимизации распределения ресурсов в резервированных комплексах транспортно-технологических машин, учитывающая структурную и временную избыточность, а также три группы критериев: экономические (минимизация затрат), надежность (максимизация коэффициента готовности) и эксплуатационные (минимизация времени ожидания).

2. Предложена система критериев эффективности, позволяющая комплексно оценивать варианты резервирования и выявлять противоречия между различными целевыми показателями.

3. Обоснован метод решения задачи на основе построения множества Парето-оптимальных решений с использованием комбинации метода взвешенных сумм, что позволяет лицу, принимающему решения, выбирать рациональный вариант с учетом приоритетов предприятия.

4. Выполнена апробация разработанного подхода на примере погрузочно-разгрузочного комплекса контейнерного терминала, в ходе которой получены Парето-оптимальные решения, демонстрирующие характер компромиссов между затратами, надежностью и временем ожидания. Установлено наличие области насыщения, когда дополнительные вложения в резервирование дают все меньший прирост надежности.

5. Выявлены ограничения предложенного подхода и определены направления дальнейших исследований, включая переход к динамическим моделям, учет стохастического характера грузопотока и отказов оборудования, а также создание программного комплекса для поддержки принятия решений.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения данного подхода для обоснования состава парка транспортно-технологических машин на предприятиях различных отраслей, включая терминально-складские комплексы, горнодобывающую промышленность, строительство и сельское хозяйство. Предложенная методология позволяет снизить эксплуатационные затраты на 10–20% при сохранении заданного уровня надежности или повысить надежность на 5–15% при неизменном бюджете.

Список источников

1. Логистика в транспортных системах / Р.С. Саттаров [и др.]. М.: Директ-Медиа, 2025. 156 с.
2. Бишутин С.Г., Кешенкова В.Г. Логистические транспортные системы: учебное пособие. Брянск: Изд-во БГТУ, 2024. 112 с.
3. Андреев О.П. Логистика автомобильного транспорта: современный подход // Естественные и технические науки. 2024. № 12 (199). С. 365–368.
4. Григорьев М.Н., Уваров С.А., Ткач В.В. Управление запасами и складская логистика: учебник для вузов. М.: Юрайт, 2026. 84 с.
5. Коваленко Н.А., Шишкина С.Н. Рациональное управление эффективностью деятельности подразделений предприятия с использованием логистических цепочек // Транспортное дело России. 2025. № 5. С. 45–46.
6. Абуев Н.М. Резервирование грузопотоков: стратегическая необходимость для транспортных коридоров // Экономика и управление: проблемы, решения. 2025. Т. 6, № 11 (164). С. 227–233. DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2025.11.06.026
7. Актуальные задачи трансформации национальных транспортно-логистических систем в условиях санкционных воздействий / Д.В. Капский [и др.] // Наука и техника. 2024. Т. 23, № 6. С. 517–525. DOI: 10.21122/2227-1031-2024-23-6-517-525
8. Шпиганович А.Н., Астанин С.С., Рычков А.В. Обеспечение отказоустойчивости систем электроснабжения посредством резервирования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 12. С. 94–98. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-94-98
9. Гусев Е.В., Марюшина З.Л., Пронкин А.А. Оптимизация резервирования системы с учетом ограничений на вес, габариты и стоимость // Научно-технический вестник Поволжья. 2024. № 11. С. 18–21.
10. Тихонов М.Р., Акуленок М.В., Шикла О.С. Разработка алгоритма расчета вероятности безотказности технологического процесса с резервированием // Современные наукоемкие технологии. 2024. № 8. С. 88–93. DOI: 10.17513/snt.40117
11. Ешимкенов А.А., Чакеева К.С. Резервированная система управления процессом как основа надежной работоспособности процессов // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами. 2022. № 1 (13). С. 55–62. DOI: 10.26731/2658-3704.2022.1(13).55-62
12. Основы теории надежности: учебник / А.В. Чепурин [и др.]. М.: Типография ПМГ, 2023. 232 с.
13. Ходырев А.И. Основы теории надежности машин. М.: РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2022. 162 с.
14. Верескун В.Д., Гуда А.Н., Мамаев Э.А. Методы управления рисками и надежностью в транспортно-логистических цепях поставок // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2024. № 4 (96). С. 153–160. DOI: 10.46973/0201-727X_2024_4_153
15. Сопилко Н.Ю., Щербакова Н.С. Основы управления производственными и материальными потоками. М.: Российский университет дружбы народов, 2024. 173 с.

16. Фирфаров А. С. Модели управления материальными потоками // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2024. № 1 (72). С. 137–148.
17. Бобровская Л. В. Экономическая сущность логистического подхода и проблемы в управлении материальными потоками в эпоху цифровизации // Финансовая экономика. 2021. № 5. С. 229–231.
18. Захарова Е. А., Давыдов Д. В. Управление материальными потоками внутри производства как основа логистических операций производственного процесса // Вестник экономики, управления и права. 2023. Т. 16, № 4. С. 13–28.
19. Nagi R. Research in Production Systems and Management: “How to” and Lessons // IFAC-PapersOnLine. 2022. Vol. 55 (10). Pp. 1104–1109. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.09.537
20. Azadeh S. S., Aydin N. Data-Driven Optimization for Transport and Logistics Systems // EURO Journal on Transportation and Logistics. 2023. Vol. 12. Art. 100119. DOI: 10.1016/j.ejtl.2023.100119
21. Komačka D., Krajčovič M., Matys M. Optimization of In-Plant Logistics Processes in Assembly Systems Using Digital Simulation Tools: A Case Study Using AGV and Twiserion Design Manager // Transportation Research Procedia. 2026. Vol. 93. Pp. 328–333. DOI: 10.1016/j.trpro.2025.11.050
22. Benčo D., Kubasáková I., Čauder P. Optimization of Intra-Company Transport and Logistics Processes within a Selected Enterprise // Transportation Research Procedia. 2026. Vol. 93. Pp. 229–235. DOI: 10.1016/j.trpro.2025.11.035

Дата поступления: 26.05.2026

Решение о публикации: 29.06.2026

Контактная информация:

ПЛАТОНОВА Марина Алексеевна — кандидат техн. наук, доцент; platonova.map@yandex.ru

Multi-Criteria Optimization of Resource Allocation in Redundant Complexes of Transport and Technological Machines

M. A. Platonova

Voronezh Institute of High Technologies, 73a Lenin st., Voronezh, 394043, Russia

For citation: *Platonova M. A. Multi-Criteria Optimization of Resource Allocation in Redundant Complexes of Transport and Technological Machines // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 3, pp. 103–115. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-103-115 (In Russian)*

Abstract

The relevance of this study stems from the need to improve the reliability and efficiency of logistics transport systems in the face of unstable freight flows and increasing demands for uninterrupted delivery.

Redundancy of machine and unit complexes is a key mechanism for ensuring a given level of reliability. However, existing approaches to reserve management fail to take into account the multi-criteria nature of the problem, leading to an unjustified increase in costs or a decrease in operational reliability. **Objective:** development of a mathematical formulation of the problem of multi-criteria optimization of resource distribution in redundant complexes of transport and technological machines and substantiation of the method for its solution. **Methods:** the study is based on methods from queuing theory, reliability theory of technical systems, multicriteria optimization, and simulation modeling. The study utilized vector optimization approaches with the construction of a set of Pareto-optimal solutions. **Results:** a formalized formulation of the vector optimization problem for redundant machine systems is presented, taking into account structural and temporal redundancy. A system of performance criteria is provided, encompassing economic, reliability, and operational indicators. An algorithm for finding optimal solutions based on the weighted sum method and a genetic algorithm is disclosed. The results of testing the developed approach using the example of a container terminal loading and unloading complex are substantiated. The theoretical significance lies in the development of a methodology for managing redundant technical systems in logistics by taking into account the multi-criteria nature of the optimization problem. **Practical significance:** the potential application of the developed approach to justifying the composition of a fleet of transport and technological vehicles and optimizing their redundancy modes at enterprises in various industries. A number of limitations (the static nature of the model, simplified representation of failures, and failure to account for interrelations between vehicles) requiring further study have been identified, and avenues for further research are presented.

Keywords: logistics transport systems, transport and technological systems, redundant machine complexes, multi-criteria optimization, reliability theory, Pareto optimality

References

1. Sattarov R.S., et al. Logistika v transportnyh sistemah [Logistics in Transport Systems], Moscow, Direkt-Media, 2025, 156 p. (In Russian)
2. Bishutin S.G., Keshenkova V.G. Logisticheskie transportnye sistemy: uchebnoe posobie [Logistic Transport Systems: Study Guide], Bryansk, BG TU [Bryansk State Technical University], 2024, 112 p. (In Russian)
3. Andreev O.P. Logistika avtomobilnogo transporta: sovremennyy podhod [Automotive Transport Logistics: A Modern Approach], *Estestvennye i tekhnicheskie nauki [Natural and Technical Sciences]*, 2024, no. 12 (199), pp. 365–368. (In Russian)
4. Grigoriev M.N., Uvarov S.A., Tkach V.V. Upravlenie zapasami i skladskaya logistika: uchebnik dlya vuzov [Inventory Management and Warehouse Logistics: A Textbook for Universities], Moscow, Yurayt Publishers, 2026, 84 p. (In Russian)
5. Kovalenko N.A., Shishkina S.N. Racional'noe upravlenie effektivnost'yu deyatel'nosti podrazdelenij predpriyatiya s ispol'zovaniem logisticheskikh cepochek [Rational Management of Enterprise Unit Performance Using Logistics Chains], *Transportnoe delo Rossii [Transport Business in Russia]*, 2025, no. 5, pp. 45–46. (In Russian)
6. Abuev N.M. Rezervirovanie gruzopotokov: strategicheskaya neobhodimost' dlya transportnykh koridorov [Cargo Flow Reservation: A Strategic Necessity for Transport Corridors], *Ekonomika i upravlenie: problemy, resheniya [Economics and Management: Problems and Solutions]*, 2025, vol. 6, no. 11 (164), pp. 227–233. DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2025.11.06.026 (In Russian)
7. Kapskiy D.V., et al. Aktual'nye zadachi transformacii nacionalnykh transportno-logisticheskikh sistem v usloviyakh sankcionnykh vozdeystviy [Current Challenges of Transforming

National Transport and Logistics Systems under Sanctions], *Nauka i tekhnika [Science and Technology]*, 2024, vol. 23, no. 6, pp. 517–525. DOI: 10.21122/2227-1031-2024-23-6-517-525 (In Russian)

8. Shpiganovich A. N., Astanin S. S., Rychkov A. V. Obespechenie otkazoustojchivosti sistem elektrosnabzheniya posredstvom rezervirovaniya [Ensuring Fault Tolerance of Power Supply Systems through Redundancy], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki [Proceedings of Tula State University. Technical Sciences]*, 2021, no. 12, pp. 94–98. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-94-98 (In Russian)

9. Gusev E. V., Maryushina Z. L., Pronkin A. A. Optimizaciya rezervirovaniya sistemy s uchetom ogranichenij na ves, gabarity i stoimost' [Optimization of System Redundancy Considering Weight, Size, and Cost Constraints], *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzhya [Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region]*, 2024, no. 11, pp. 18–21. (In Russian)

10. Tikhonov M. R., Akulyonok M. V., Shikula O. S. Razrabotka algoritma raschyota veroyatnosti bezotkaznosti tekhnologicheskogo processa s rezervirovaniem [Development of an Algorithm for Calculating the Reliability Probability of a Technological Process with Redundancy], *Sovremennye naukoemkie tekhnologii [Modern High Technologies]*, 2024, no. 8, pp. 88–93. DOI: 10.17513/snt.40117 (In Russian)

11. Eshimkenov A. A., Chakeeva K. S. Rezervirovannaya sistema upravleniya processom kak osnova nadezhnoj rabotosposobnosti processov [Redundant Process Control System as the Basis for Reliable Process Performance], *Informacionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnymi sistemami [Information Technologies and Mathematical Modeling in Complex System Management]*, 2022, no. 1 (13), pp. 55–62. DOI: 10.26731/2658-3704.2022.1(13).55-62 (In Russian)

12. Chepurin A. V., et al. Osnovy teorii nadezhnosti: uchebnik [Fundamentals of Reliability Theory: A Textbook], Moscow, PMG Printing House, 2023, 232 p. (In Russian)

13. Khodyrev A. I. Osnovy teorii nadezhnosti mashin [Fundamentals of Machine Reliability Theory], Moscow, RGU nefti i gaza (NIU) im. I. M. Gubkina [Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)], 2022, 162 p. (In Russian)

14. Vereskun V. D., Guda A. N., Mamaev E. A. Metody upravleniya riskami i nadyozhnost'yu v transportno-logisticheskikh cepyah postavok [Risk and Reliability Management Methods in Transport and Logistics Supply Chains], *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya [Bulletin of Rostov State Transport University]*, 2024, no. 4 (96), pp. 153–160. DOI: 10.46973/0201-727X_2024_4_153 (In Russian)

15. Sopilko N. Yu., Shcherbakova N. S. Osnovy upravleniya proizvodstvennymi i materialnymi potokami [Fundamentals of Managing Production and Material Flows], Moscow, Rossijskij universitet druzhby narodov [Peoples' Friendship University of Russia], 2024, 173 p. (In Russian)

16. Firfarov A. S. Modeli upravleniya materialnymi potokami [Models of Material Flow Management], *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of Pacific National University]*, 2024, no. 1 (72), pp. 137–148. (In Russian)

17. Bobrovskaya L.V. Ekonomicheskaya sushchnost' logisticheskogo podhoda i problemy v upravlenii material'nymi potokami v epohu cifrovizacii [Economic Essence of the Logistics Approach and Challenges in Material Flow Management in the Digital Age], *Finansovaya ekonomika [Financial Economics]*, 2021, no. 5, pp. 229–231. (In Russian)
18. Zakharova E.A., Davydov D.V. Upravlenie material'nymi potokami vnutri proizvodstva kak osnova logisticheskikh operacij proizvodstvennogo processa [Managing Material Flows within Production as the Basis of Logistics Operations in the Production Process], *Vestnik ekonomiki, upravleniya i prava [Bulletin of Economics, Management and Law]*, 2023, vol. 16, no. 4, pp. 13–28. (In Russian)
19. Nagi R. Research in Production Systems and Management: “How to” and Lessons, *IFAC-PapersOnLine*, 2022, vol. 55 (10), pp. 1104–1109. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.09.537
20. Azadeh S.S., Aydin N. Data-Driven Optimization for Transport and Logistics Systems, *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 2023, vol. 12, art. 100119. DOI: 10.1016/j.ejtl.2023.100119
21. Komačka D., Krajčovič M., Matys M. Optimization of In-Plant Logistics Processes in Assembly Systems Using Digital Simulation Tools: A Case Study Using AGV and Twiserion Design Manager, *Transportation Research Procedia*, 2026, vol. 93, pp. 328–333. DOI: 10.1016/j.trpro.2025.11.050
22. Benčo D., Kubasáková I., Čauder P. Optimization of Intra-Company Transport and Logistics Processes within a Selected Enterprise, *Transportation Research Procedia*, 2026, vol. 93, pp. 229–235. DOI: 10.1016/j.trpro.2025.11.035

Received: May 26, 2026

Accepted: June 29, 2026

Author's information:

Marina A. PLATONOVA — PhD in Engineering, Associate Professor; platonova.map@yandex.ru

УДК 621.31

Применение новых моделей прогнозирования на основе искусственного интеллекта, новых материалов и новых механизмов для совершенствования системы заземления опор

Т. В. Хмельницкая, А. Ю. Сулимин, А. В. Агунов, А. А. Бобров

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

Для цитирования: Хмельницкая Т. В., Сулимин А. Ю., Агунов А. В., Бобров А. А. Применение новых моделей прогнозирования на основе искусственного интеллекта, новых материалов и новых механизмов для совершенствования системы заземления опор // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 3. С. 116–125. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-116-125

Аннотация

Цель: совершенствование системы заземления опор контактной сети переменного тока за счет разработки устройства дистанционного контроля состояния искровых промежутков и газоразрядных приборов защиты, а также обоснования применения интеллектуальных ИИ-агентов для обработки диагностических данных и перехода от реактивного к прогнозному обслуживанию. **Методы:** сравнительный анализ существующих методов контроля. Предложено конструктивное решение на основе индикатора короткого замыкания в сочетании с беспилотными летательными аппаратами и средствами интеллектуальной видеоаналитики. **Результаты:** предложенное решение обеспечивает бесконтактную дистанционную диагностику без вывода оборудования из эксплуатации и не требует значительных конструктивных изменений. **Практическая значимость:** непрерывность контроля, раннее выявление скрытых дефектов и деградационных процессов, повышение электробезопасности, оптимизация эксплуатационных затрат и снижение нагрузки на персонал службы электроснабжения.

Ключевые слова: система заземления, дистанционный контроль, индикатор короткого замыкания, цифровой двойник, предиктивное обслуживание

Введение

Обеспечение надежности и безопасности функционирования систем заземления опор контактной сети как новых высокоскоростных магистралей (ВСМ), так и существующих линий неразрывно связано с исправной работой всех устройств защиты, объектов инфраструктуры и средств диагностики. Одними из наиболее актуальных вопросов в настоящее время являются разработка и внедрение малообслуживаемых систем. Важнейшими элементами системы заземления являются искровые промежутки (ИП) и газоразрядные приборы защиты (ГРПЗ), устанавливаемые на заземляющие спуски.

Применяемая в настоящее время система заземления опор контактной сети обладает рядом существенных недостатков: высокими эксплуатационными затратами, низким ресурсом ИП и ГРПЗ, а также отсутствием дистанционного контроля. Сегодня устройства защиты проходят диагностику путем ручного определения параметров и визуального осмотра, что влечет за собой существенные трудозатраты.

При этом снижается точность получаемых измерений, а обнаружение неисправностей нередко происходит с задержкой, что недопустимо для систем, критически важных для безопасности движения.

В связи с этим перспективным направлением совершенствования системы заземления является применение новых материалов, а также использование методов прогнозирования остаточного ресурса и дистанционного контроля. Так, в исследованиях [7, 8] произведена оценка электробезопасности опор контактной сети без изменения свойств бетона в качестве естественного заземлителя. Результаты показали соответствие принятого отказа от заземления опоры на рельс нормативным требованиям при правильном выборе троса группового заземления (ТГЗ). В исследованиях [9, 10] описаны условия электробезопасности при использовании фундаментов опор контактной сети из электропроводящего бетона, при этом исследования подтвердили соответствие такого решения требованиям электробезопасности.

Практическая значимость работы заключается в возможности перехода от реактивного к прогнозному обслуживанию заземляющих устройств, сокращении трудозатрат персонала службы электроснабжения, повышении электробезопасности и оперативности ликвидации аварийных ситуаций. Целью настоящей работы является разработка устройства дистанционного контроля состояния ИП и ГРПЗ, а также обоснование применения интеллектуальных ИИ-агентов для обработки диагностических данных в интересах построения инфраструктуры цифровой железной дороги нового поколения.

Существующие подходы к контролю состояния элементов системы заземления

В рабочем режиме искровой промежуток устанавливается в разрыв заземляющего спуска, обеспечивая электрическую изоляцию опоры от рельсовой сети.

В настоящее время исправность ИП определяется с помощью вольтметра или специализированного прибора ПК-2, шкала которого проградуирована в диапазоне 20–100 В. Методика проверки состоит в следующем: при прохождении электроподвижного состава (ЭПС) на ИП подается потенциал рельса, вызванный тяговым током. Если ИП исправен, то стрелка прибора отклоняется. Отсутствие отклонения свидетельствует о пробое (коротком замыкании) ИП и требует его немедленной замены. Все данные о проверках и заменах фиксируются в журнале учета района контактной сети.

Данный метод обладает рядом недостатков:

1. Проверка возможна только в момент прохождения ЭПС, что при больших межпоездных интервалах существенно затягивает процесс диагностики.
2. Штатный потенциал рельса (до 100 В) значительно ниже норматива пробивного напряжения ИП (1500 В), что не позволяет полноценно оценить состояние изоляции.

Для модернизации диагностики ИП и устранения недостатков существующих методов на первом этапе исследования рассматривалась система контроля на основе RFID-технологий. Суть метода заключается в фиксации разрушения метки при пробое ИП: ионизированный газ, проходя через калиброванное отверстие, повреждает RFID-чип, что при последующем считывании определяется как сигнал о неисправности. Данный подход может быть автоматизирован с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), оснащенных RFID-считывателями.

Конструктивные решения по обеспечению дистанционного контроля

В качестве развития указанного подхода предложено модернизировать метод контроля состояния ИП, заменив RFID-идентификацию на термоиндикаторное окрашивание. При возникновении пробоя и перегреве изолятора покрытие меняет цвет, БПЛА в это время с помощью видеокамер определяет цвет и фиксирует состояние. Применение ГРПЗ в данном контексте нецелесообразно, поскольку устройство рассчитано на многократное, но ограниченное срабатывание, а для оценки его остаточного ресурса важен учет количества циклов срабатывания.

Несмотря на то что ГРПЗ считается более технологичным решением, его ресурс ограничен 12 срабатываниями, а фактический срок службы напрямую зависит от величины тока пробоя. Это создает эксплуатационные сложности, связанные с отсутствием информации о реальном остаточном ресурсе устройства и его работоспособном состоянии (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Сравнительные параметры ГРПЗ и ИП

Характеристика	ГРПЗ-1У	ИПМ-62
Напряжение пробоя, В	1400–1700	800–1200
Амплитуда тока пробоя, кА	до 9	5–6
Длительность импульса, мс	40	100
Количество срабатываний	не более 12	1
Возможность дистанционной диагностики	отсутствует	отсутствует

Устройство дистанционного контроля работы ГРПЗ

Сегодня контроль состояния заземляющих устройств осуществляется электромонтерами вручную посредством мегаомметра. Для повышения эффективности эксплуатации данных систем целесообразно внедрение дистанционной диагностики, обеспечивающей оперативное оповещение о неисправностях. Автоматизация процесса позволит оптимизировать трудозатраты персонала и минимизировать риски возникновения аварийных ситуаций. В качестве перспективного решения

предлагается использование комплекса, состоящего из роторных индикаторов короткого замыкания (ИКЗ) и БПЛА.

Поскольку выход из строя ИП или ГРПЗ связан с протеканием электрического тока, предлагается интегрировать ИКЗ непосредственно в стержень спуска коммутационного оборудования. В случае повреждения заземляющего устройства ИКЗ фиксирует прохождение тока, при этом роторный индикатор сменит цвет с зеленого на красный, сигнализируя о критическом состоянии ИП или ГРПЗ и необходимости их замены. Технические характеристики предлагаемого ИКЗ представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Технические характеристики ИКЗ

Характеристика	Значение
Ток срабатывания	Варьируется в зависимости от рода тока
Время срабатывания	0,1 с
Температурный диапазон	–40...+85 °С
Возобновление работы	Вручную, изолированной штангой
Материал	Хомут — сталь, корпус — полиамид

Концепция дистанционного мониторинга заземляющих устройств основывается на применении БПЛА. Интеграция БПЛА с ИКЗ и алгоритмами интеллектуальной видеоаналитики позволит автоматизировать контроль состояния заземлителей путем фиксации рабочего положения ИКЗ, заполнения дефектных ведомостей с указанием номера ближайшей опоры и передачи GPS-координат.

Данное решение обладает рядом преимуществ: оно не требует существенной доработки конструкции, позволяет проводить дистанционную бесконтактную диагностику без остановки оборудования и исключает необходимость ручных замеров. В перспективе функционал ИКЗ позволит производить счет пробоев для определения остаточного ресурса ГРПЗ, а также автоматически формировать электронные дефектные ведомости с привязкой к геолокации.

Использование ИИ-агентов для обработки данных

ИИ-агент — это автономная программно-аппаратная система, взаимодействующая с окружающей средой через датчики и исполняющие объекты и функционирующая в соответствии с заданной целевой функцией. Ключевыми характеристиками ИИ-агента являются автономность, реактивность, проактивность и социальность. Существующие классы агентов обладают разными возможностями. Для задач мониторинга системы заземления сформулированы следующие требования:

- непрерывность получения входных данных;
- постоянная корректировка результатов;
- способность к самообучению;
- структуризация событий по критичности, распределенности и отказоустойчивости.

Простые агенты не удовлетворяют требованиям прогнозирования и работы с неполными данными, а целевые избыточны для задач мониторинга. Наилучшим вариантом является гибридная мультиагентная архитектура, сочетающая:

- обучающихся агентов нижнего уровня для обработки сигналов датчиков и определения аномалий;
- агентов на основе цифровых двойников устройств и всей системы заземления;
- агентов на основе полезности для формирования и распределения уведомлений.

Такая архитектура обеспечивает баланс между вычислительной способностью, точностью и надежностью.

Анализ данных

Входными данными для агентов являются показания измерительных приборов, данные цифровых двойников (виртуальных моделей опор и устройств защиты) и метаданные. Они носят разнородный характер: непрерывные временные ряды, дискретные события и категориальные признаки, что сподвигает к предварительной обработке (фильтрации, нормализации, устранению пропусков и синхронизации по времени). Первичный статистический анализ связан с расчетом описательных характеристик параметров заземления и формированием эталонного состояния.

Обнаружение аномалий осуществляется методами контроля выхода за ограничения, анализа временных рядов и машинного обучения. Прогнозирование остаточного ресурса и оценка вероятности отказа выполняются с применением регрессионных моделей и методов классификации, что позволяет реализовать концепцию прогнозного обслуживания.

Результаты анализа преобразуются в сообщения, сортированные по важности:

- информационные уведомления о нормальной работе;
- предупреждающие уведомления при вероятности ухудшения состояния;
- критические сообщения об отказах.

Такая многоуровневая схема реализует принцип управления по отклонениям и снижает информационную нагрузку на персонал.

Система строится по трехуровневой схеме:

1. Нижний уровень образуют устройства защиты и измерительные устройства, а также локальные обучающиеся агенты первичной обработки сигналов.

2. Средний уровень реализует цифровых двойников и координирующих агентов, поддерживающих синхронизацию моделей с реальными объектами.

3. Верхний уровень обеспечивает ведение единой статистической базы, обучение прогнозных моделей, формирование отчетности и взаимодействие с персоналом.

Работа системы организуется в виде непрерывного цикла «восприятие — синхронизация — анализ — оценка — действие — обучение», что обеспечивает переход от реактивного к проактивному управлению.

Заключение

В ходе выполнения работы был проведен анализ существующих подходов к контролю состояния элементов системы заземления опор контактной сети: искровых промежутков и газоразрядных приборов защиты. Установлено, что применяемые в настоящее время методы проверки обладают рядом существенных недостатков: высокой погрешностью измерений, значительными трудозатратами и необходимостью частичного демонтажа устройств.

На основании выявленных недостатков предложено конструктивное решение системы дистанционного контроля, основанное на использовании индикатора короткого замыкания роторного типа, интегрируемого в стержень заземляющего спуска, в сочетании с беспилотными летательными аппаратами и средствами интеллектуальной видеоаналитики. Данное решение обеспечивает бесконтактную диагностику оборудования без вывода из эксплуатации, не требует значительных конструктивных изменений, отличается бюджетной эффективностью и работоспособностью в широком температурном диапазоне.

Для обработки диагностических данных обоснован выбор гибридной мультиагентной архитектуры на основе интеллектуальных ИИ-агентов, сочетающей обучающихся агентов нижнего уровня, агентов на основе модели и агентов на основе полезности. Предложена трехуровневая система мониторинга с интеграцией цифровых двойников опор, реализующая непрерывный цикл функционирования. Применение методов статистического анализа и машинного обучения позволяет реализовать концепцию предиктивного обслуживания и многоуровневую адресную маршрутизацию уведомлений по уровню критичности.

Таким образом, разработанные решения обеспечивают непрерывность контроля, раннее выявление скрытых дефектов и деградационных процессов, повышение электробезопасности за счет сокращения времени реакции на критические отказы, оптимизацию затрат на обслуживание и снижение нагрузки на персонал. Интеграция агентной системы с цифровыми двойниками формирует единое информационное пространство, позволяющее не только фиксировать текущее состояние заземляющих устройств, но и моделировать их поведение при различных сценариях эксплуатации, что соответствует задачам построения инфраструктуры цифровой железной дороги нового поколения.

Список источников

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года: распоряжение Правительства Российской Федерации от 17.06.2008 № 877-р.
2. ЦЭ-191. Инструкция по заземлению устройств электроснабжения на электрифицированных железных дорогах. М.: МПС РФ, 1993. 69 с.
3. Оценка условий электробезопасности при применении опор контактной сети в качестве естественных заземлителей / Т. С. Титова [и др.] // Электротехника. 2021. № 2. С. 7–11.
4. ГОСТ Р 12.1.038-2024. ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов. М.: Издательство стандартов, 2024. 16 с.
5. Железобетонная опора контактной сети, эксплуатируемая без заземления на рельс: патент № 213503 РФ / А. В. Агунов [и др.] // Бюллетень изобретений. 2022. № 26.
6. Электропроводящий бетон: патент № 2810991 РФ / И. А. Баранов [и др.] // Бюллетень изобретений. 2024. № 1.
7. Кремлев И. А., Терехин И. А., Скоков Р. Б. Перспектива развития системы тягового электроснабжения переменного тока с опорами контактной сети, не заземленными на рельс // Бюллетень результатов научных исследований. 2020. Вып. 4. С. 57–66.
8. Терехин И. А. Совершенствование системы заземления опор контактной сети в тяговом электроснабжении переменного тока: дис. ... канд. техн. наук. СПб.: ПГУПС, 2018. 135 с.
9. Баранов И. А., Сулимин А. Ю., Терехин И. А. Вопросы электробезопасности при применении электропроводящего железобетона в фундаментах опор контактной сети переменного тока // Вестник Московского энергетического института. 2026. Вып. 2. С. 22–29.
10. Карякин Р. Н. Заземляющие устройства электроустановок: справочник. М., 2002. 374 с.
11. Платонов А. В., Филонин Е. Н. Безопасность жизнедеятельности: учебное пособие. Изд. 2-е, испр. Н. Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2012. 345 с.
12. Соединители и коммутационные устройства: учебное пособие / И. Б. Бондаренко [и др.]. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007. 151 с.
13. IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems. IEEE SA Standard's Board, 2007. 225 p.
14. ГОСТ Р 58882-2020. Заземляющие устройства. Системы уравнивания потенциалов. Заземлители. Заземляющие проводники: технические требования. М.: Стандартиформ, 2020. 45 с.
15. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход. М.: Вильямс, 2021.
16. Тарасов В. Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям. М.: Эдиториал УРСС, 2002.
17. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1982.
18. Правила устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200058170>
19. Wooldridge M. An Introduction to MultiAgent Systems. Wiley, 2009.

Дата поступления: 15.07.2026

Решение о публикации: 30.08.2026

Контактная информация:

ХМЕЛЬНИЦКАЯ Тамара Вячеславовна — магистр кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы»; khmelnitskaya@pgups.ru

СУЛИМИН Артем Юрьевич — аспирант кафедры «Электроснабжение железных дорог»; sulimin@pgups.ru;

АГУНОВ Александр Викторович — доктор техн. наук, заведующий кафедры «Электроснабжение железной дороги»; agunov@pgups.ru;

БОБРОВ Андрей Алексеевич — начальник Управления энергетического и инженерного обеспечения; andrey.JP@yandex.ru

Application of New Forecasting Models Based on Artificial Intelligence, New Materials and New Mechanisms to Improve the Grounding System of Supports

T. V. Khmel'nitskaya, A. Yu. Sulimin, A. V. Agunov, A. A. Bobrov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Khmel'nitskaya T. V., Sulimin A. Yu., Agunov A. V., Bobrov A. A.* Application of New Forecasting Models Based on Artificial Intelligence, New Materials and New Mechanisms to Improve the Grounding System of Supports // *Bulletin of Scientific Research Results*, 2026, iss. 3, pp. 116–125. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-116-125 (In Russian)

Abstract

Objective: to improve the grounding system for AC contact network supports by developing a device for remote monitoring of the state of spark gaps and gas-discharge protection devices, as well as substantiating the use of intelligent AI agents to process diagnostic data and transition from reactive to predictive maintenance.

Methods: comparative analysis of existing control methods. A constructive solution based on a short-circuit indicator is proposed, in combination with unmanned aerial vehicles and intelligent video analytics tools.

Results: the proposed solution provides contactless remote diagnostics without decommissioning the equipment and does not require significant design changes. **Practical significance:** continuous monitoring, early detection of hidden defects and degradation processes, increased electrical safety, optimization of operating costs and reduction of the burden on the personnel of the power supply service.

Keywords: grounding system, remote monitoring, short circuit indicator, digital twin, predictive maintenance

References

1. Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossijskoj Federacii do 2030 goda: rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 17.06.2008 no. 877-r [Strategy for the Development of Railway Transport in the Russian Federation until 2030: Order of the Government of Russian Federation, dated June 17, 2008, no. 877-r]. (In Russian)

2. CE-191. Instruksiya po zazemleniyu ustroystv elektrosnabzheniya na elektrifitsirovannykh zheleznykh dorogakh [Instruction CE191 on Grounding of Power Supply Devices on Electrified Railways], Moscow, Ministry of Railways of the Russian Federation, 1993, 69 p. (In Russian)
3. Titova T. S., et al. Otsenka uslovij elektrobezopasnosti pri primenenii opor kontaktnoj seti v kachestve estestvennykh zazemlitlej [Assessment of Electrical Safety Conditions When Using Overhead Line Poles as Natural Grounding Electrodes], *Elektrotehnika [Electrical Engineering]*, 2021, no. 2, pp. 7–11. (In Russian)
4. GOST R 12.1.038-2024. SSBT. Elektrobezopasnost'. Predel'no dopustimye urovni napryazhenij prikosnoveniya i tokov [GOST R 12.1.038-2024. Occupational Safety Standards System. Electrical Safety. Maximum Permissible Levels of Touch Voltages and Currents], Moscow, Izdatel'stvo standartov [Publishing House of Standards], 2024, 16 p. (In Russian)
5. Agunov A. V., et al. Zhelezobonnaya opora kontaktnoj seti, ekspluatiruemaya bez zazemleniya na rel's: patent № 213503 RF [Reinforced Concrete Support of a Contact Network Operated without Grounding on a Rail: patent no. 213503 of the Russian Federation], *Byulleten' izobretenij [Bulletin of Inventions]*, 2022, no. 26 (In Russian)
6. Baranov I. A., et al. Elektroprovodyashchij beton [Electrically Conductive Concrete]. Patent RF, no. 2810991, 2024. (In Russian)
7. Kremlev I. A., Terekhin I. A., Skokov R. B. Perspektiva razvitiya sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka s oporami kontaktnoj seti, ne zazemlennymi na rel's [Prospects for the Development of AC Traction Power Supply Systems with Overhead Line Poles Not Grounded to the Rail], *Bulleten' rezul'tatov nauchnyh issledovanij [Bulletin of Research Results]*, 2020, iss. 4, pp. 57–66. (In Russian)
8. Terekhin I. A. Sovershenstvovanie sistemy zazemleniya opor kontaktnoj seti v tyagovom elektrosnabzhenii peremennogo toka: dis. ... kand. tekhn. nauk [Improving the Grounding System of Overhead Line Poles in AC Traction Power Supply: PhD in Engineering, diss.], St. Petersburg: PGUPS [Petersburg State Transport University], 2018, 135 p. (In Russian)
9. Baranov I. A., Sulimin A. Yu., Terekhin I. A. Voprosy elektrobezopasnosti pri primenenii elektroprovodyashchego zhelezobetona v fundamentakh opor kontaktnoj seti peremennogo toka [Electrical Safety Issues When Using Electrically Conductive Reinforced Concrete in Foundations of AC Overhead Line Poles], *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta [Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute]*, 2026, iss. 2, pp. 22–29. (In Russian)
10. Karyakin R. N. Zazemlyayushchie ustrojstva elektroustanovok: spravochnik [Grounding Devices for Electrical Installations: Handbook], Moscow, 2002, 374 p. (In Russian)
11. Platonov A. V., Filonin E. N. Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti: uchebnoe posobie, Izd. 2-e, ispr. [Life Safety: A Textbook. 2nd edition, revised], Nizhniy Novgorod, NGTU im. R. E. Alekseeva [Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev], 2012, 345 p. (In Russian)
12. Bondarenko I. B., et al. Soediniteli i kommutatsionnye ustrojstva: uchebnoe posobie [Connectors and Switching Devices: A Textbook], St. Petersburg: SPbGU ITMO [Saint Petersburg State University of Information Technologies], 2007, 151 p. (In Russian)

13. IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems, IEEE SA Standards Board, 2007, 225 p.
14. GOST R 58882-2020. Zazemlyayushchie ustrojstva. Sistemy uravnivaniya potentsialov. Zazemliteli. Zazemlyayushchie provodniki: tekhnicheskie trebovaniya [GOST R 58882-2020. Grounding Devices. Potential Equalization Systems. Ground Electrodes. Grounding Conductors: Technical Requirements], Moscow, Standartinform, 2020, 45 p. (In Russian)
15. Russell S., Norvig P. Iskusstvennyj intellekt: sovremennyy podkhod [Artificial Intelligence: A Modern Approach], Moscow, Vilyams, 2021. (In Russian)
16. Tarasov V. B. Ot mnogoagentnykh sistem k intellektual'nykh organizatsiyam [From Multi-Agent Systems to Intelligent Organizations], Moscow, Editorial URSS, 2002. (In Russian)
17. Markvardt K. G. Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Power Supply of Electrified Railways], Moscow, Transport, 1982. (In Russian)
18. Pravila ustrojstva i tekhnicheskoy ekspluatatsii kontaktnoj seti elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Rules for the Installation and Technical Operation of Overhead Lines on Electrified Railways]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200058170> (In Russian)
19. Wooldridge M. An Introduction to Multi-Agent Systems, Wiley, 2009.

Received: July 15, 2026

Accepted: August 30, 2026

Author's information:

Tamara V. KHMEL'NITSKAYA — Master of the “Land-Based Transport and Technological Complexes” Department; khmelnitskaya@pgups.ru

Artyom Yu. SULIMIN — Postgraduate Student of the “Electric Power Supply of Railways” Department; sulimin@pgups.ru

Aleksandr V. AGUNOV — Dr. Sci. in Engineering, Head of the “Railway Power Supply” Department; agunov@pgups.ru

Andrey A. BOBROV — Head of the “Energy and Engineering Support” Department; andrey.JP@yandex.ru

ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

УДК 621.355:004.94

Метод оценки SOH литий-ионных аккумуляторов на основе тренда импеданса

Ч. Си

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Россия, 197022, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5

Для цитирования: Си Ч. Метод оценки SOH литий-ионных аккумуляторов на основе тренда импеданса // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 3. С. 126–137. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-126-137

Аннотация

Цель: предложить метод оценки состояния литий-ионных аккумуляторов (SOH), основанный на низко-размерном описании нормированного тренда импеданса $Z(p)$, формируемого по временным зависимостям напряжения и тока при переменном воздействии без проведения полной частотной электрохимической импедансной спектроскопии. **Методы:** исходный импедансный отклик сегментировался по полярности тока, нормировался в координате прогресса $p \in [0, 1]$ и усреднялся для получения тренда $Z(p)$. Из этого тренда выделялись три диагностических показателя: среднее значение на участке плато P , модуль наклона на участке плато S и величина конечного отклонения E . Такое представление позволяет перейти от полной кривой импедансного отклика к компактному набору параметров, пригодных для последующей регрессионной обработки. Связь указанных признаков с SOH устанавливалась с помощью квадратичной регрессионной модели, коэффициенты которой определялись методом наименьших квадратов. **Результаты:** экспериментальная проверка на элементах LIR2032 и NCR18650B выявила, что показатели P , E и S отражают изменение уровня, формы и конечных областей импедансного тренда при старении аккумулятора. Для LIR2032 получено $R^2 = 0,9987$ при $RMSE = 1,23 \%$, для NCR18650B — $R^2 = 0,9715$ при $RMSE = 5,19 \%$. **Практическая значимость:** предложенный подход характеризуется низкой вычислительной сложностью, интерпретируемостью признаков и может использоваться как основа для алгоритмов BMS и онлайн-диагностики аккумуляторных систем. Метод может быть реализован без существенного увеличения вычислительной нагрузки и адаптирован к различным типам литий-ионных элементов после калибровки модели.

Ключевые слова: импедансный отклик, тренд импеданса, извлечение признаков, показатели $P/E/S$, SOH, онлайн-диагностика, BMS, литий-ионные аккумуляторы

Введение

В системах накопления энергии, электротранспорте и резервных источниках питания точная оценка состояния литий-ионных аккумуляторов имеет ключевое значение для обеспечения безопасности, эксплуатационной надежности и рационального использования ресурса. Особенно актуальна эта задача для крупномасштабных систем накопления энергии, характеризующихся большим числом

элементов, длительным сроком службы и переменными режимами работы. В таких условиях оценка состояния здоровья аккумуляторов (SOH) определяет не только стратегию эксплуатации и технического обслуживания, но и общий уровень безопасности и эффективности системы [1, 2]. Поэтому разработка методов оценки SOH, пригодных для онлайн-применения, остается одной из важных задач диагностики аккумуляторных систем.

Существующие исследования показывают, что импедансное представление, формируемое на основе отклика аккумулятора на переменное воздействие, обладает высокой чувствительностью к процессам деградации и может эффективно использоваться для оценки SOH [3]. В отечественных исследованиях также подтверждена диагностическая информативность импедансного подхода: анализ кривой Найквиста используется для ускоренной оценки состояния аккумуляторных батарей [4], а спектроскопия электрохимического импеданса — для определения параметров литиевых источников тока, чувствительных к уровню заряда, и построения эквивалентных схем [5]. В реальных условиях эксплуатации аккумуляторные системы функционируют в динамической среде, формируемой силовыми преобразователями, где переключательные процессы и особенности алгоритмов управления вызывают пульсации и малые возмущения. Это создает предпосылки для получения информации, связанной с импедансным откликом, непосредственно в процессе работы системы [6]. В последние годы предложен ряд подходов к онлайн- и квазионлайн-измерению импеданса за счет введения малых возмущений со стороны силового преобразователя [7, 8], что подтверждает возможность интеграции подобных методов в реальные энергетические системы без проведения автономных офлайн-испытаний.

Большинство существующих подходов ориентировано на частотный анализ или методы электрохимической импедансной спектроскопии (EIS). В настоящей работе, напротив, используется импедансное представление, формируемое непосредственно на основе временных зависимостей напряжения и тока при АС-возбуждении, без явного перехода в частотную область. Основное внимание уделяется параметрическому описанию формы полученного тренда импеданса.

Для практической оценки SOH принципиальное значение имеет выбор диагностических признаков. Они должны быть чувствительны к процессам деградации, устойчивы к изменению рабочих условий и одновременно обладать низкой размерностью и физической интерпретируемостью, что особенно важно для реализации в реальных системах [9–11]. В связи с этим в работе используется подход низкоразмерной параметризации тренда импеданса, позволяющий компактно описывать его основные морфологические особенности и использовать полученные показатели для оценки SOH.

Измерительная система и построение усредненного тренда $Z(p)$

Для формирования импедансного тренда, характеризующего состояние аккумулятора, импедансный отклик сначала сегментируется по изменению полярности тока, то есть границы участков задаются моментами прохождения тока через ноль. Непрерывная запись тем самым разделяется на отдельные участки заряда и разряда. Поскольку эти участки различаются по длительности, числу отсчетов и локальной форме отклика, их нельзя непосредственно сопоставлять на исходной временной оси. Поэтому каждый участок переводится в нормированную координату прогресса $p \in [0, 1]$, где $p = 0$ соответствует началу участка, а $p = 1$ — его окончанию. Далее все участки выравниваются на общей оси прогресса и для одинаковых интервалов по p вычисляются средние значения, по которым формируется импедансный тренд, соответствующий данному состоянию аккумулятора. Таким образом, $Z(p)$ представляет собой не мгновенную кривую отклика отдельного цикла, а усредненный тренд, полученный по нескольким участкам заряда и разряда, относящимся к одному и тому же состоянию.

В настоящей работе в качестве условия завершения эксперимента принимается снижение емкости аккумулятора примерно до 80 % от ее начального значения. Пусть начальная емкость аккумулятора равна C_0 . Когда емкость уменьшается до

$$C_{\text{end}} = 0,8C_0, \quad (1)$$

считается, что аккумулятор достиг конечного состояния, принятого в рамках данного эксперимента. Пусть от его начала до завершения аккумулятора проходит N циклов заряда-разряда, а рассматриваемому этапу соответствует число циклов n . Тогда метка состояния определяется следующим образом:

$$\text{SOH} = \left(1 - \frac{n}{N}\right) \cdot 100 \%. \quad (2)$$

Определение показателей $P/E/S$ и разбиение по окнам

Непрерывный тренд $Z(p)$, полученный на предыдущем этапе, содержит основную информацию о форме импедансного отклика, однако неудобен для компактного сопоставления различных состояний и последующего количественного анализа. Поэтому далее он описывается небольшим числом информативных показателей, выделяемых по заранее заданным окнам с учетом особенностей различных участков кривой.

На рис. 1 представлены усредненные тренды $Z(p)$ для элементов LIR2032 и NCR18650B в различных состояниях. Видно, что различия между ними проявляются прежде всего в уровне плато, характере изменения кривой на среднем участке и степени отклонения концевых областей относительно центральной части. Именно эти особенности положены в основу введения показателей P , S и E .

Среднее значение на плато P : характеристика базового уровня импеданса

На концах цикла кривая импеданса сильнее подвержена пограничным эффектам, связанным с переходными процессами в начале и конце участка, а также с неравномерностью дискретизации. Поэтому базовый уровень целесообразно оценивать на относительно стабильном участке. В работе окно плато задается как $p \in [0,30, 0,80)$, а среднее значение на этом интервале определяется как P :

$$P = \text{mean}(Z(p)), p \in [0,30, 0,80). \quad (3)$$

Рост показателя P при старении аккумулятора может быть связан с увеличением омической и поляризационной составляющих импеданса, поэтому P рассматривается как количественная характеристика изменения базового уровня импеданса по мере деградации.

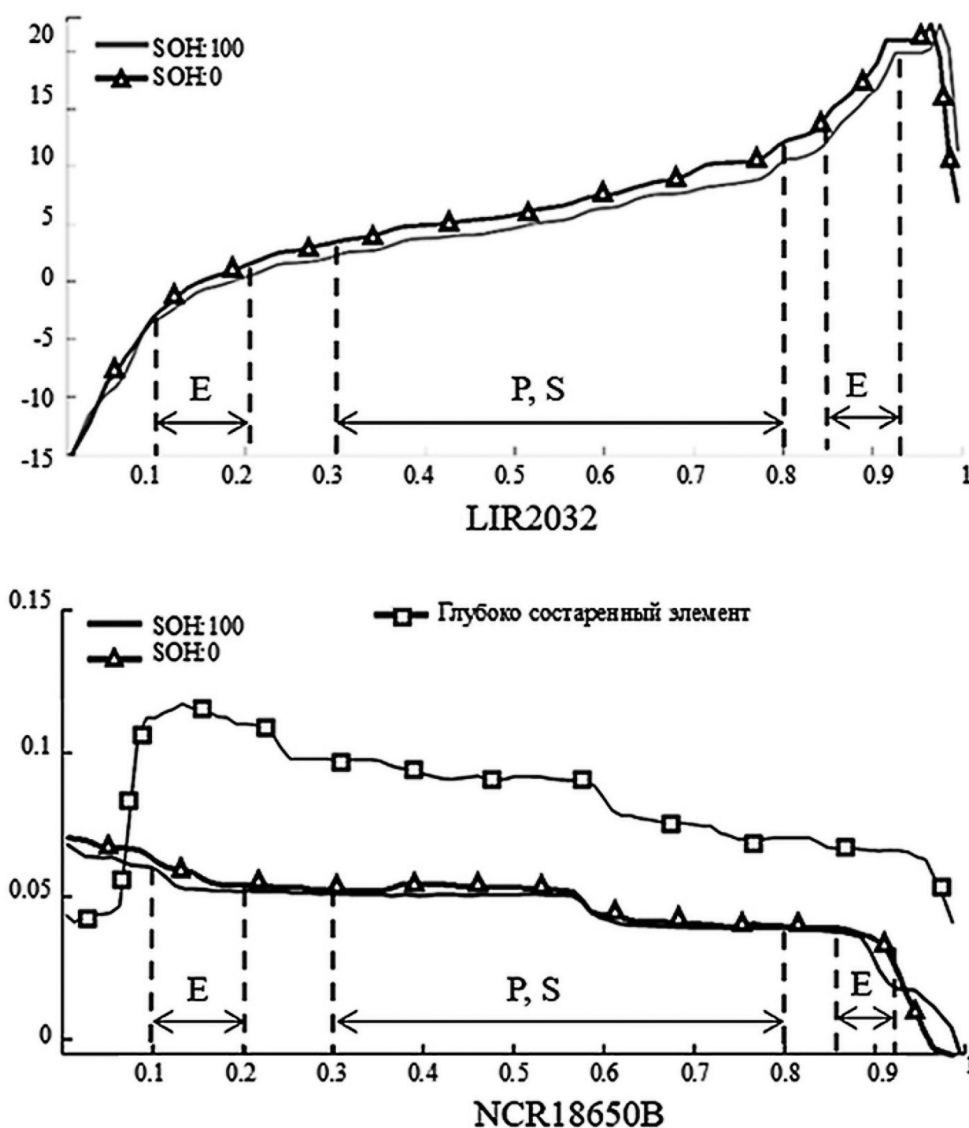


Рис. 1. Эволюция усредненного тренда $Z(p)$ для исследуемых литий-ионных элементов

Модуль наклона на плато S: характеристика систематического изменения на участке плато

Среднего значения на плато недостаточно для различения двух случаев — почти горизонтального плато и плато с выраженным градиентом. Для количественного описания систематического изменения на участке плато в том же окне $p \in [0,30, 0,80)$ выполняется линейная аппроксимация $Z(p)$ методом наименьших квадратов:

$$Z(p) \approx kp + b, \quad p \in [0,30, 0,80). \quad (4)$$

Модуль наклона на плато определяется как абсолютное значение оцененного коэффициента наклона:

$$S = |k|. \quad (5)$$

Использование модуля позволяет характеризовать выраженность изменения на участке плато независимо от направления общего тренда.

Величина концевого отклонения E: характеристика отклонения концов относительно плато

В ряде циклов основные различия проявляются не внутри плато, а в концевых областях — в виде дополнительного отклонения относительно его опорного уровня. Для количественного описания этого эффекта в качестве опорной линии используется линейная аппроксимация плато $\hat{Z}(p) = k \cdot p + b$, а остаток определяется как:

$$r(p) = Z(p) - \hat{Z}(p). \quad (6)$$

Поскольку общий тренд может иметь различное направление, вводится коэффициент направления $\text{dir} = \text{sign}(k)$. Далее учитывается только положительное отклонение вдоль направления тренда, после чего вычисляется среднее значение в левом окне $p \in [0,10, 0,20)$ и правом окне $p \in [0,85, 0,92)$:

$$E_1 = \text{mean}(\max(0, \text{dir} \cdot r(p))), \quad p \in [0,10, 0,20); \quad (7)$$

$$E_2 = \text{mean}(\max(0, \text{dir} \cdot r(p))), \quad p \in [0,85, 0,92); \quad (8)$$

$$E = (E_1 + E_2) / 2. \quad (9)$$

Концевые окна не примыкают непосредственно к 0 и 1, что позволяет снизить влияние переходных процессов и ошибок дискретизации и тем самым повысить устойчивость оценки. Полученный показатель E используется для количественного описания отклонения концевых участков относительно плато.

Соответствующие значения параметров $P / E / S$ для различных состояний SOH приведены в табл. 1 и табл. 2.

ТАБЛИЦА 1. Соответствие SOH и показателей $P / E / S$ (LIR2032)

SOH, %	P — среднее значение на плато	E — величина конечного отклонения	S — модуль наклона на плато
100	0,0572	0,0237	0,1463
75,24	0,0594	0,0259	0,1527
56,19	0,056	0,0182	0,1546
22,86	0,0653	0,036	0,2117
0	0,0724	0,0346	0,2125

ТАБЛИЦА 2. Соответствие SOH и показателей $P / E / S$ (NCR18650B)

SOH, %	P — среднее значение на плато	E — величина конечного отклонения	S — модуль наклона на плато
100	0,0457	0,0047	0,0333
76,92	0,049	0,0026	0,0314
50	0,0544	0,0043	0,0369
26,92	0,0557	0,0035	0,0361
0	0,0614	0,0061	0,0433

Анализ табл. 1 и 2 демонстрирует, что показатели P , E и S являются информативными по отношению к деградации аккумулятора. Для LIR2032 при переходе от SOH = 100 % к SOH = 0 % наблюдается рост базового уровня плато P примерно на 26,6 %, а также усиление деформации кривой, выражающееся в увеличении показателей E и S примерно на 46 и 45 % соответственно. Для NCR18650B наиболее устойчивую и монотонную зависимость демонстрирует показатель P , увеличивающийся примерно на 34,4 %, тогда как E и S характеризуются большей вариативностью, отражающей различия в конечных эффектах и динамике поляризационных процессов. Это подтверждает целесообразность использования трехкомпонентного описания «уровень плато — наклон плато — конечное отклонение».

Регрессионная аппроксимация SOH по показателям $P / E / S$

После получения показателей P , E и S устанавливается их количественная связь с состоянием здоровья аккумулятора SOH. Для обеспечения сопоставимости результатов для различных типов элементов используется единая форма регрессионного уравнения, тогда как коэффициенты отдельно калибруются для LIR2032 и NCR18650B.

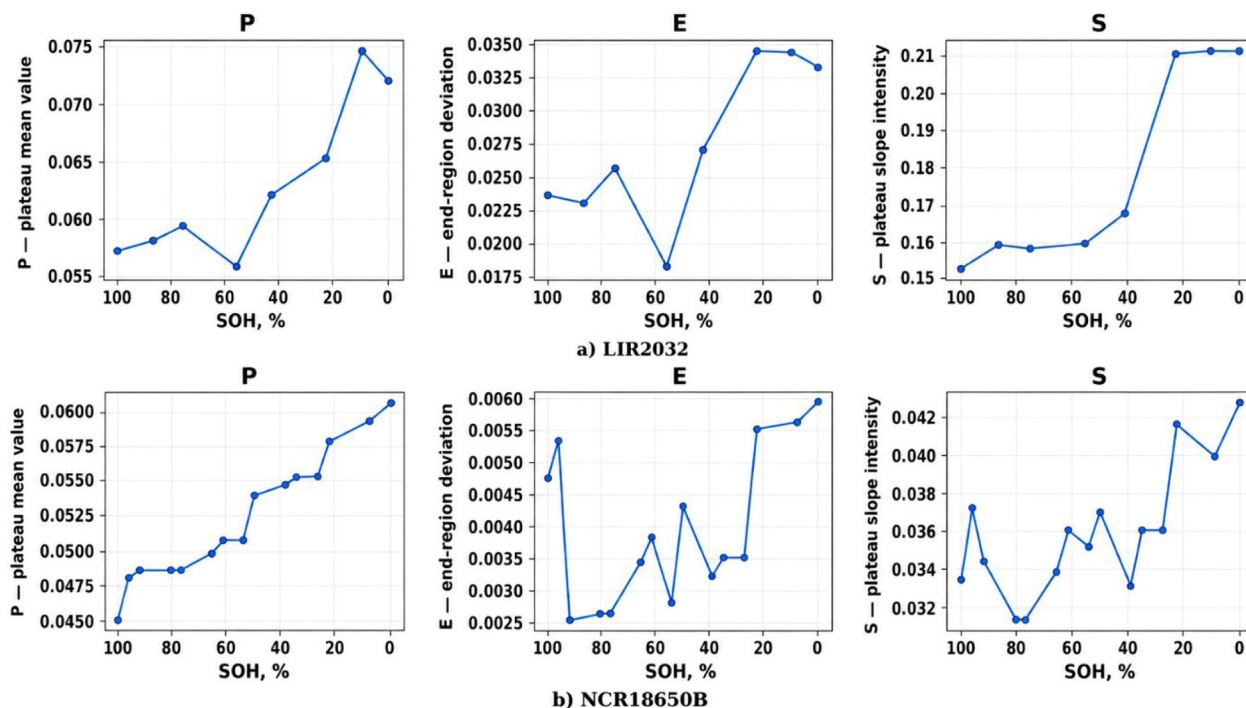


Рис. 2. Зависимости показателей P , E и S от SOH

Единая форма регрессионного уравнения и обоснование выбора

Пусть для i -й точки испытаний среднее значение на плато равно P_i , величина концевой отклонения — E_i , модуль наклона на плато — S_i , а значение состояния здоровья, определенное емкостным методом, обозначено как SOH_i . Все три показателя извлекаются из синтетической кривой $Z(p)$ по единому правилу разбиения на окна и обладают однозначным физическим смыслом.

С учетом возможной нелинейной связи между SOH и импедансными признаками, а также ограниченного объема выборки в работе выбрана квадратичная полиномиальная регрессионная модель как компромисс между аппроксимирующей способностью и вычислительной простотой. По сравнению с линейной моделью она позволяет учитывать нелинейные эффекты, а по сравнению с моделями более высокого порядка требует меньшего числа параметров, сохраняет интерпретируемость и снижает риск переобучения. В связи с этим единая форма уравнения задается следующим образом:

$$\hat{SOH} = \beta_0 + \beta_1 P + \beta_2 E + \beta_3 S + \beta_4 P^2 + \beta_5 E^2 + \beta_6 S^2. \quad (10)$$

В регрессионное уравнение включены квадратичные члены P^2 , E^2 и S^2 , но не включены попарные произведения PE , PS и ES . Такое упрощение выбрано сознательно: при ограниченном объеме выборки введение перекрестных членов увеличивает число параметров, повышает риск переобучения и может ухудшать устойчивость оценок вследствие мультиколлинеарности. При этом выбранная форма сохраняет интерпретируемость и обеспечивает достаточную

ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

УДК 621.355:004.94

Метод оценки SOH литий-ионных аккумуляторов на основе тренда импеданса

Ч. Си

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Россия, 197022, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5

Для цитирования: Си Ч. Метод оценки SOH литий-ионных аккумуляторов на основе тренда импеданса // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 3. С. 126–137. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-126-137

Аннотация

Цель: предложить метод оценки состояния литий-ионных аккумуляторов (SOH), основанный на низко-размерном описании нормированного тренда импеданса $Z(p)$, формируемого по временным зависимостям напряжения и тока при переменном воздействии без проведения полной частотной электрохимической импедансной спектроскопии. **Методы:** исходный импедансный отклик сегментировался по полярности тока, нормировался в координате прогресса $p \in [0, 1]$ и усреднялся для получения тренда $Z(p)$. Из этого тренда выделялись три диагностических показателя: среднее значение на участке плато P , модуль наклона на участке плато S и величина конечного отклонения E . Такое представление позволяет перейти от полной кривой импедансного отклика к компактному набору параметров, пригодных для последующей регрессионной обработки. Связь указанных признаков с SOH устанавливалась с помощью квадратичной регрессионной модели, коэффициенты которой определялись методом наименьших квадратов. **Результаты:** экспериментальная проверка на элементах LIR2032 и NCR18650B выявила, что показатели P , E и S отражают изменение уровня, формы и конечных областей импедансного тренда при старении аккумулятора. Для LIR2032 получено $R^2 = 0,9987$ при $RMSE = 1,23 \%$, для NCR18650B — $R^2 = 0,9715$ при $RMSE = 5,19 \%$. **Практическая значимость:** предложенный подход характеризуется низкой вычислительной сложностью, интерпретируемостью признаков и может использоваться как основа для алгоритмов BMS и онлайн-диагностики аккумуляторных систем. Метод может быть реализован без существенного увеличения вычислительной нагрузки и адаптирован к различным типам литий-ионных элементов после калибровки модели.

Ключевые слова: импедансный отклик, тренд импеданса, извлечение признаков, показатели $P/E/S$, SOH, онлайн-диагностика, BMS, литий-ионные аккумуляторы

Введение

В системах накопления энергии, электротранспорте и резервных источниках питания точная оценка состояния литий-ионных аккумуляторов имеет ключевое значение для обеспечения безопасности, эксплуатационной надежности и рационального использования ресурса. Особенно актуальна эта задача для крупномасштабных систем накопления энергии, характеризующихся большим числом

элементов, длительным сроком службы и переменными режимами работы. В таких условиях оценка состояния здоровья аккумуляторов (SOH) определяет не только стратегию эксплуатации и технического обслуживания, но и общий уровень безопасности и эффективности системы [1, 2]. Поэтому разработка методов оценки SOH, пригодных для онлайн-применения, остается одной из важных задач диагностики аккумуляторных систем.

Существующие исследования показывают, что импедансное представление, формируемое на основе отклика аккумулятора на переменное воздействие, обладает высокой чувствительностью к процессам деградации и может эффективно использоваться для оценки SOH [3]. В отечественных исследованиях также подтверждена диагностическая информативность импедансного подхода: анализ кривой Найквиста используется для ускоренной оценки состояния аккумуляторных батарей [4], а спектроскопия электрохимического импеданса — для определения параметров литиевых источников тока, чувствительных к уровню заряда, и построения эквивалентных схем [5]. В реальных условиях эксплуатации аккумуляторные системы функционируют в динамической среде, формируемой силовыми преобразователями, где переключательные процессы и особенности алгоритмов управления вызывают пульсации и малые возмущения. Это создает предпосылки для получения информации, связанной с импедансным откликом, непосредственно в процессе работы системы [6]. В последние годы предложен ряд подходов к онлайн- и квазионлайн-измерению импеданса за счет введения малых возмущений со стороны силового преобразователя [7, 8], что подтверждает возможность интеграции подобных методов в реальные энергетические системы без проведения автономных офлайн-испытаний.

Большинство существующих подходов ориентировано на частотный анализ или методы электрохимической импедансной спектроскопии (EIS). В настоящей работе, напротив, используется импедансное представление, формируемое непосредственно на основе временных зависимостей напряжения и тока при АС-возбуждении, без явного перехода в частотную область. Основное внимание уделяется параметрическому описанию формы полученного тренда импеданса.

Для практической оценки SOH принципиальное значение имеет выбор диагностических признаков. Они должны быть чувствительны к процессам деградации, устойчивы к изменению рабочих условий и одновременно обладать низкой размерностью и физической интерпретируемостью, что особенно важно для реализации в реальных системах [9–11]. В связи с этим в работе используется подход низкоразмерной параметризации тренда импеданса, позволяющий компактно описывать его основные морфологические особенности и использовать полученные показатели для оценки SOH.

Измерительная система и построение усредненного тренда $Z(p)$

Для формирования импедансного тренда, характеризующего состояние аккумулятора, импедансный отклик сначала сегментируется по изменению полярности тока, то есть границы участков задаются моментами прохождения тока через ноль. Непрерывная запись тем самым разделяется на отдельные участки заряда и разряда. Поскольку эти участки различаются по длительности, числу отсчетов и локальной форме отклика, их нельзя непосредственно сопоставлять на исходной временной оси. Поэтому каждый участок переводится в нормированную координату прогресса $p \in [0, 1]$, где $p = 0$ соответствует началу участка, а $p = 1$ — его окончанию. Далее все участки выравниваются на общей оси прогресса и для одинаковых интервалов по p вычисляются средние значения, по которым формируется импедансный тренд, соответствующий данному состоянию аккумулятора. Таким образом, $Z(p)$ представляет собой не мгновенную кривую отклика отдельного цикла, а усредненный тренд, полученный по нескольким участкам заряда и разряда, относящимся к одному и тому же состоянию.

В настоящей работе в качестве условия завершения эксперимента принимается снижение емкости аккумулятора примерно до 80 % от ее начального значения. Пусть начальная емкость аккумулятора равна C_0 . Когда емкость уменьшается до

$$C_{\text{end}} = 0,8C_0, \quad (1)$$

считается, что аккумулятор достиг конечного состояния, принятого в рамках данного эксперимента. Пусть от его начала до завершения аккумулятора проходит N циклов заряда-разряда, а рассматриваемому этапу соответствует число циклов n . Тогда метка состояния определяется следующим образом:

$$\text{SOH} = \left(1 - \frac{n}{N}\right) \cdot 100 \%. \quad (2)$$

Определение показателей $P/E/S$ и разбиение по окнам

Непрерывный тренд $Z(p)$, полученный на предыдущем этапе, содержит основную информацию о форме импедансного отклика, однако неудобен для компактного сопоставления различных состояний и последующего количественного анализа. Поэтому далее он описывается небольшим числом информативных показателей, выделяемых по заранее заданным окнам с учетом особенностей различных участков кривой.

На рис. 1 представлены усредненные тренды $Z(p)$ для элементов LIR2032 и NCR18650B в различных состояниях. Видно, что различия между ними проявляются прежде всего в уровне плато, характере изменения кривой на среднем участке и степени отклонения концевых областей относительно центральной части. Именно эти особенности положены в основу введения показателей P , S и E .

Среднее значение на плато P : характеристика базового уровня импеданса

На концах цикла кривая импеданса сильнее подвержена пограничным эффектам, связанным с переходными процессами в начале и конце участка, а также с неравномерностью дискретизации. Поэтому базовый уровень целесообразно оценивать на относительно стабильном участке. В работе окно плато задается как $p \in [0,30, 0,80)$, а среднее значение на этом интервале определяется как P :

$$P = \text{mean}(Z(p)), p \in [0,30, 0,80). \quad (3)$$

Рост показателя P при старении аккумулятора может быть связан с увеличением омической и поляризационной составляющих импеданса, поэтому P рассматривается как количественная характеристика изменения базового уровня импеданса по мере деградации.

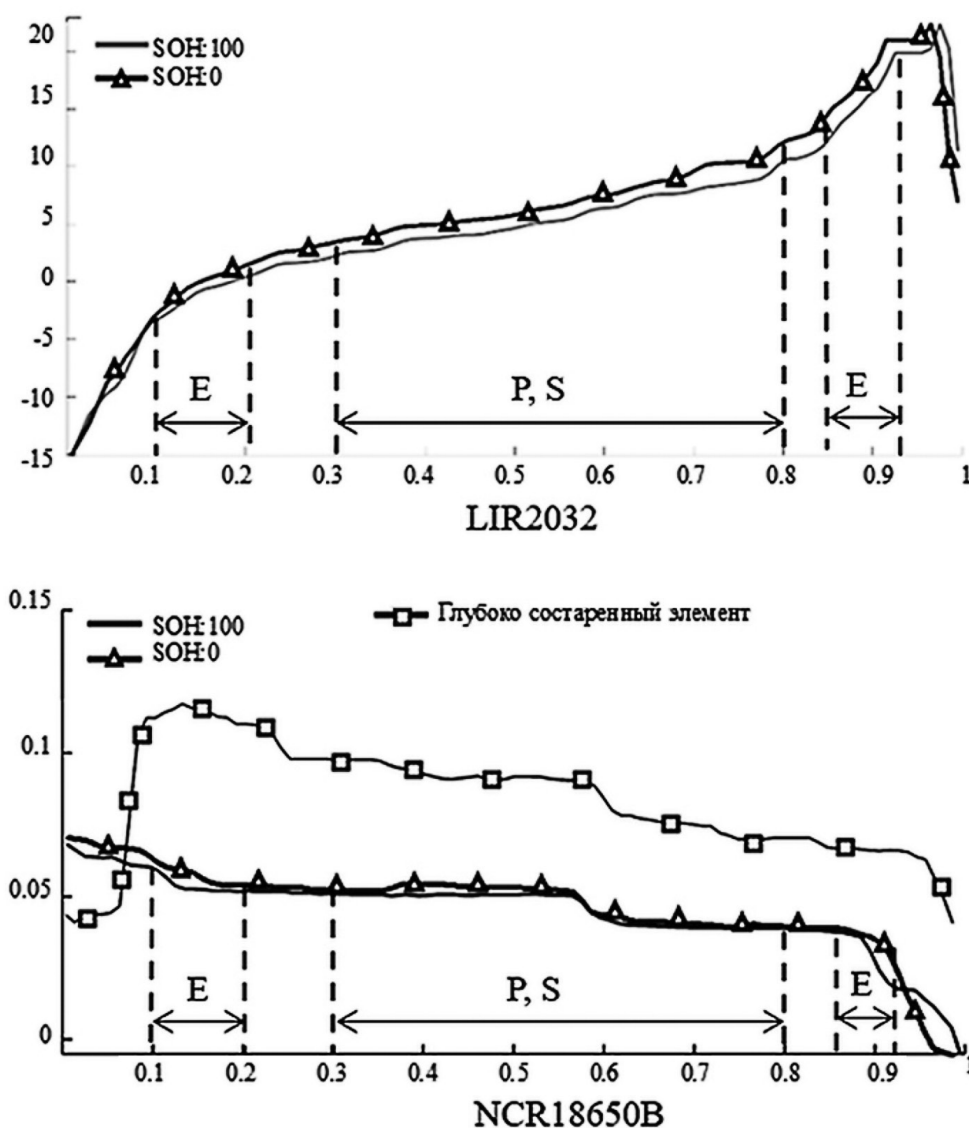


Рис. 1. Эволюция усредненного тренда $Z(p)$ для исследуемых литий-ионных элементов

Модуль наклона на плато S: характеристика систематического изменения на участке плато

Среднего значения на плато недостаточно для различения двух случаев — почти горизонтального плато и плато с выраженным градиентом. Для количественного описания систематического изменения на участке плато в том же окне $p \in [0,30, 0,80)$ выполняется линейная аппроксимация $Z(p)$ методом наименьших квадратов:

$$Z(p) \approx kp + b, \quad p \in [0,30, 0,80). \quad (4)$$

Модуль наклона на плато определяется как абсолютное значение оцененного коэффициента наклона:

$$S = |k|. \quad (5)$$

Использование модуля позволяет характеризовать выраженность изменения на участке плато независимо от направления общего тренда.

Величина концевое отклонения E: характеристика отклонения концов относительно плато

В ряде циклов основные различия проявляются не внутри плато, а в концевых областях — в виде дополнительного отклонения относительно его опорного уровня. Для количественного описания этого эффекта в качестве опорной линии используется линейная аппроксимация плато $\hat{Z}(p) = k \cdot p + b$, а остаток определяется как:

$$r(p) = Z(p) - \hat{Z}(p). \quad (6)$$

Поскольку общий тренд может иметь различное направление, вводится коэффициент направления $\text{dir} = \text{sign}(k)$. Далее учитывается только положительное отклонение вдоль направления тренда, после чего вычисляется среднее значение в левом окне $p \in [0,10, 0,20)$ и правом окне $p \in [0,85, 0,92)$:

$$E_1 = \text{mean}(\max(0, \text{dir} \cdot r(p))), \quad p \in [0,10, 0,20); \quad (7)$$

$$E_2 = \text{mean}(\max(0, \text{dir} \cdot r(p))), \quad p \in [0,85, 0,92); \quad (8)$$

$$E = (E_1 + E_2) / 2. \quad (9)$$

Концевые окна не примыкают непосредственно к 0 и 1, что позволяет снизить влияние переходных процессов и ошибок дискретизации и тем самым повысить устойчивость оценки. Полученный показатель E используется для количественного описания отклонения концевых участков относительно плато.

Соответствующие значения параметров $P / E / S$ для различных состояний SOH приведены в табл. 1 и табл. 2.

ТАБЛИЦА 1. Соответствие SOH и показателей $P / E / S$ (LIR2032)

SOH, %	P — среднее значение на плато	E — величина конечного отклонения	S — модуль наклона на плато
100	0,0572	0,0237	0,1463
75,24	0,0594	0,0259	0,1527
56,19	0,056	0,0182	0,1546
22,86	0,0653	0,036	0,2117
0	0,0724	0,0346	0,2125

ТАБЛИЦА 2. Соответствие SOH и показателей $P / E / S$ (NCR18650B)

SOH, %	P — среднее значение на плато	E — величина конечного отклонения	S — модуль наклона на плато
100	0,0457	0,0047	0,0333
76,92	0,049	0,0026	0,0314
50	0,0544	0,0043	0,0369
26,92	0,0557	0,0035	0,0361
0	0,0614	0,0061	0,0433

Анализ табл. 1 и 2 демонстрирует, что показатели P , E и S являются информативными по отношению к деградации аккумулятора. Для LIR2032 при переходе от SOH = 100 % к SOH = 0 % наблюдается рост базового уровня плато P примерно на 26,6 %, а также усиление деформации кривой, выражающееся в увеличении показателей E и S примерно на 46 и 45 % соответственно. Для NCR18650B наиболее устойчивую и монотонную зависимость демонстрирует показатель P , увеличивающийся примерно на 34,4 %, тогда как E и S характеризуются большей вариативностью, отражающей различия в конечных эффектах и динамике поляризационных процессов. Это подтверждает целесообразность использования трехкомпонентного описания «уровень плато — наклон плато — конечное отклонение».

Регрессионная аппроксимация SOH по показателям $P / E / S$

После получения показателей P , E и S устанавливается их количественная связь с состоянием здоровья аккумулятора SOH. Для обеспечения сопоставимости результатов для различных типов элементов используется единая форма регрессионного уравнения, тогда как коэффициенты отдельно калибруются для LIR2032 и NCR18650B.

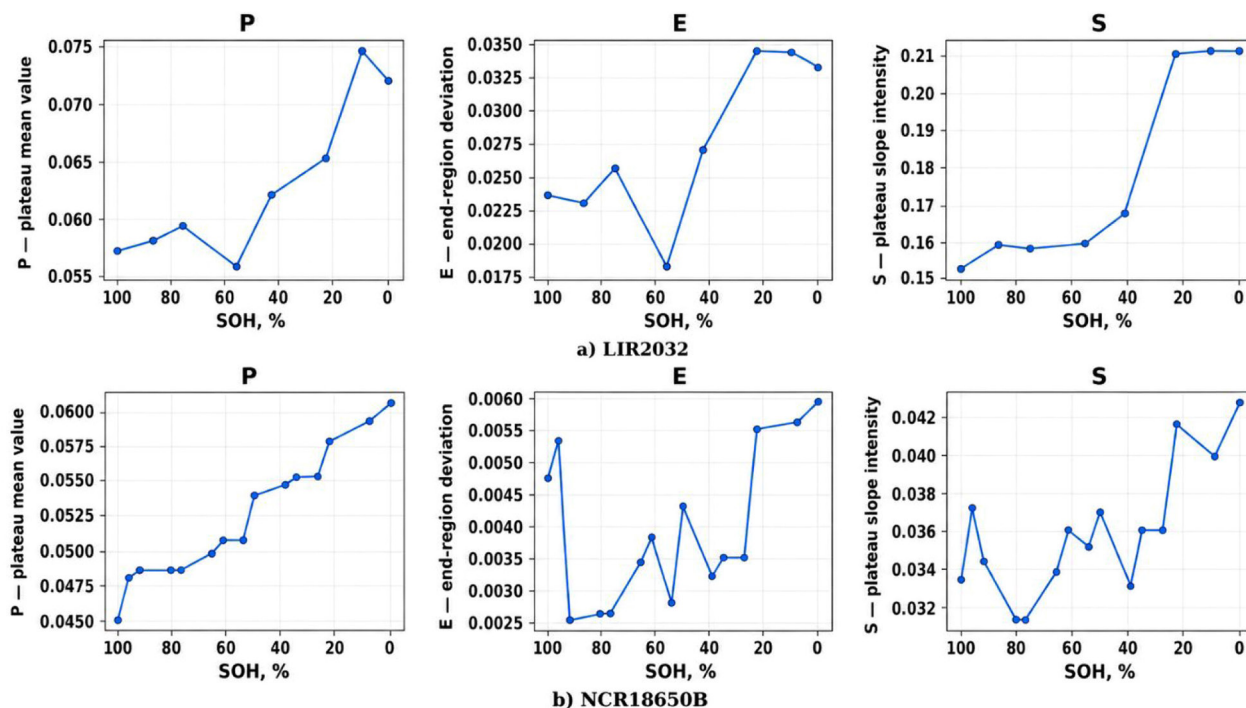


Рис. 2. Зависимости показателей P , E и S от SOH

Единая форма регрессионного уравнения и обоснование выбора

Пусть для i -й точки испытаний среднее значение на плато равно P_i , величина концевой отклонения — E_i , модуль наклона на плато — S_i , а значение состояния здоровья, определенное емкостным методом, обозначено как SOH_i . Все три показателя извлекаются из синтетической кривой $Z(p)$ по единому правилу разбиения на окна и обладают однозначным физическим смыслом.

С учетом возможной нелинейной связи между SOH и импедансными признаками, а также ограниченного объема выборки в работе выбрана квадратичная полиномиальная регрессионная модель как компромисс между аппроксимирующей способностью и вычислительной простотой. По сравнению с линейной моделью она позволяет учитывать нелинейные эффекты, а по сравнению с моделями более высокого порядка требует меньшего числа параметров, сохраняет интерпретируемость и снижает риск переобучения. В связи с этим единая форма уравнения задается следующим образом:

$$\hat{SOH} = \beta_0 + \beta_1 P + \beta_2 E + \beta_3 S + \beta_4 P^2 + \beta_5 E^2 + \beta_6 S^2. \quad (10)$$

В регрессионное уравнение включены квадратичные члены P^2 , E^2 и S^2 , но не включены попарные произведения PE , PS и ES . Такое упрощение выбрано сознательно: при ограниченном объеме выборки введение перекрестных членов увеличивает число параметров, повышает риск переобучения и может ухудшать устойчивость оценок вследствие мультиколлинеарности. При этом выбранная форма сохраняет интерпретируемость и обеспечивает достаточную

аппроксимирующую способность для калибровки зависимости SOH от P , E и S в рамках рассматриваемых испытаний.

Оценка коэффициентов методом наименьших квадратов и порядок вычислений

Для каждого типа аккумуляторов экспериментальные данные (P , E , S , SOH) подставляются в указанную модель, а коэффициенты регрессии определяются путем минимизации суммы квадратов невязок. Порядок вычислений следующий:

1. По набору образцов формируется матрица регрессоров A , где i -я строка имеет вид $[1, P_i, E_i, S_i, P_i^2, E_i^2, S_i^2]$; одновременно формируется вектор наблюдений b , i -й элемент которого равен SOH_i .

2. В качестве целевой функции принимается минимизация суммы квадратов невязок:

$$\min_{\beta} \sum_i (\text{SOH}_i - \widehat{\text{SOH}}_i)^2. \quad (11)$$

3. Из нормальных уравнений метода наименьших квадратов получаем замкнутое выражение для вектора коэффициентов β :

$$\beta = (A^T A)^{-1} A^T b. \quad (12)$$

Здесь β — вектор искомых коэффициентов. Подставляя найденные значения в единое уравнение, получают регрессионную модель SOH для соответствующего типа аккумуляторов.

На практике прямое вычисление коэффициентов может быть численно неустойчивым из-за плохой обусловленности матрицы регрессоров, вызванной, в частности, коррелированностью P и P^2 , а также различием масштабов признаков для разных типов элементов. Поэтому при реализации расчета целесообразно использовать устойчивые алгоритмы МНК на основе QR-разложения или SVD, что эквивалентно решению через псевдообратную матрицу и позволяет избежать явного обращения матриц. При необходимости дополнительно применяется нормировка признаков P , E и S для улучшения обусловленности и воспроизводимости вычислений.

Результаты аппроксимации и оценка точности

По результатам аппроксимации для LIR2032 получено $R^2 = 0,9987$ при $\text{RMSE} = 1,229$ и $\text{MAE} = 0,856$; для NCR18650B — $R^2 = 0,9715$ при $\text{RMSE} = 5,191$ и $\text{MAE} = 3,935$. При единой структуре модели в обоих случаях достигается достаточно высокая точность аппроксимации, что подтверждает информативность показателей P , E и S для описания изменения SOH.

аппроксимирующую способность для калибровки зависимости SOH от P , E и S в рамках рассматриваемых испытаний.

Оценка коэффициентов методом наименьших квадратов и порядок вычислений

Для каждого типа аккумуляторов экспериментальные данные (P , E , S , SOH) подставляются в указанную модель, а коэффициенты регрессии определяются путем минимизации суммы квадратов невязок. Порядок вычислений следующий:

1. По набору образцов формируется матрица регрессоров A , где i -я строка имеет вид $[1, P_i, E_i, S_i, P_i^2, E_i^2, S_i^2]$; одновременно формируется вектор наблюдений b , i -й элемент которого равен SOH_i .

2. В качестве целевой функции принимается минимизация суммы квадратов невязок:

$$\min_{\beta} \sum_i (\text{SOH}_i - \widehat{\text{SOH}}_i)^2. \quad (11)$$

3. Из нормальных уравнений метода наименьших квадратов получаем замкнутое выражение для вектора коэффициентов β :

$$\beta = (A^T A)^{-1} A^T b. \quad (12)$$

Здесь β — вектор искомых коэффициентов. Подставляя найденные значения в единое уравнение, получают регрессионную модель SOH для соответствующего типа аккумуляторов.

На практике прямое вычисление коэффициентов может быть численно неустойчивым из-за плохой обусловленности матрицы регрессоров, вызванной, в частности, коррелированностью P и P^2 , а также различием масштабов признаков для разных типов элементов. Поэтому при реализации расчета целесообразно использовать устойчивые алгоритмы МНК на основе QR-разложения или SVD, что эквивалентно решению через псевдообратную матрицу и позволяет избежать явного обращения матриц. При необходимости дополнительно применяется нормировка признаков P , E и S для улучшения обусловленности и воспроизводимости вычислений.

Результаты аппроксимации и оценка точности

По результатам аппроксимации для LIR2032 получено $R^2 = 0,9987$ при $\text{RMSE} = 1,229$ и $\text{MAE} = 0,856$; для NCR18650B — $R^2 = 0,9715$ при $\text{RMSE} = 5,191$ и $\text{MAE} = 3,935$. При единой структуре модели в обоих случаях достигается достаточно высокая точность аппроксимации, что подтверждает информативность показателей P , E и S для описания изменения SOH.

Коэффициенты регрессии для двух типов аккумуляторов приведены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Коэффициенты регрессии для аппроксимации SOH

Коэфф.	LIR2032	NCR18650B
β_0	$5,597 \cdot 10^3$	$-1,759 \cdot 10^2$
β_1	$-2,443 \cdot 10^3$	$1,406 \cdot 10^4$
β_2	$8,670 \cdot 10^2$	$-2,99 \cdot 10^4$
β_3	$1,635 \cdot 10^4$	$5,623 \cdot 10^3$
β_4	$1,729 \cdot 10^2$	$-2,009 \cdot 10^5$
β_5	$-1,443 \cdot 10^2$	$4,285 \cdot 10^6$
β_6	$-3,809 \cdot 10^4$	$-8,014 \cdot 10^4$

Заключение

В работе предложен метод оценки SOH литий-ионных аккумуляторов, основанный на низкоразмерной параметризации тренда импеданса. Метод позволяет описывать основные морфологические особенности импедансного отклика с помощью небольшого числа физически интерпретируемых показателей и тем самым формирует компактную параметрическую основу для последующей количественной оценки SOH.

Экспериментальная проверка показала, что для двух типов литий-ионных элементов предложенный подход обеспечивает устойчивую связь между параметрами тренда импеданса и SOH. Это свидетельствует о диагностической информативности системы показателей P , E и S и подтверждает применимость данного подхода к аккумуляторам различного типа.

Предложенный метод характеризуется низкой вычислительной сложностью, физической интерпретируемостью параметров и простотой практической реализации, что делает его перспективным для применения в системах управления аккумуляторами и задачах онлайн-диагностики. В дальнейшем целесообразно расширить экспериментальную базу, проанализировать влияние температуры, режимов нагрузки и типа элементов на устойчивость модели, а также исследовать возможность межтиповой калибровки параметров для повышения универсальности и инженерной применимости метода.

Список источников

1. Practical State Estimation Using Kalman Filter Methods for Large-Scale Battery Systems / Z. Wang [et al.] // Applied Energy. 2021. Vol. 294. Art. 117022. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.117022

2. State-of-Health Estimation of Batteries in an Energy Storage System Based on the Actual Operating Parameters / Q. Zhang [et al.] // Journal of Power Sources. 2021. Vol. 506. Art. 230162. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2021.230162
3. State of Health Estimation of Lithium-Ion Battery Based on Electrochemical Impedance Spectroscopy / M. Fan [et al.] // Energies. 2023. Vol. 16, no. 8. Art. 3393. DOI: 10.3390/en16083393
4. Диагностика состояния аккумуляторной батареи электромобиля на основе анализа кривой Найквиста и импедансной спектроскопии / А. Н. Борзенков [и др.] // Электротехника. 2026. № 6. С. 2–8.
5. Спектроскопия электрохимического импеданса литиевых источников тока / А. Г. Попов [и др.] // Труды Московского физико-технического института. 2022. Т. 14, № 1 (53). С. 78–87. DOI: 10.53815/20726759_2022_14_1_78
6. Xia Z., Abu Qahouq J.A. High Frequency Online Battery Impedance Measurement Method Using Voltage and Current Ripples Generated by DC-DC Converter // IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). 2020. Pp. 1333–1338. DOI: 10.1109/APEC39645.2020.9124465
7. Yao Q., Lu D.-D.-C., Lei G. Accurate Online Battery Impedance Measurement Method with Low Output Voltage Ripples on Power Converters // Energies. 2021. Vol. 14, no. 4. Art. 1064. DOI: 10.3390/en14041064
8. Online Impedance Measurement of Operational Batteries Utilizing Sinc Function Signal Injection Via DC-DC Power Converter / L. Huang [et al.] // Measurement. 2024. Vol. 225. Art. 114058. DOI: 10.1016/j.measurement.2023.114058
9. Шамарова Н. А. Анализ методов оценки уровня заряда аккумуляторных батарей // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14, № 1 (53). С. 24–33.
10. Борисов П. В., Воробьев А. А. Обзор алгоритма программного обеспечения для диагностики остаточного ресурса литий-ионных аккумуляторных батарей тягового подвижного состава // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2023. Т. 20, вып. 2. С. 471–477. DOI: 10.20295/1815–588X-2023-2-471-477
11. Хандорин М. М., Букреев В. Г. Методика оценки остаточной емкости литий-ионной аккумуляторной батареи при изменении температуры аккумулятора // Доклады ТУСУР. 2017. Т. 20, № 2. С. 120–122. DOI: 10.21293/1818-0442-2017-20-2-120-122

Дата поступления: 22.04.2026

Решение о публикации: 29.06.2026

Контактная информация:

СИ Чжэньчао — аспирант; xizhenchao@foxmail.com

Method for Estimating the SOH of Lithium-Ion Batteries Based on the Impedance Trend

Zh. Xi

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" named after V. I. Ulyanov (Lenin), 5 Professora Popova st., St. Petersburg, 197022, Russia

For citation: Xi Zh. Method for Estimating the SOH of Lithium-Ion Batteries Based on the Impedance Trend // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 3, pp. 126–137. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-126-137 (In Russian)

Abstract

Objective: to propose a method for estimating the state of health (SOH) of lithium-ion batteries based on a low-dimensional description of the normalized impedance trend $Z(p)$, formed from time-domain voltage and current responses under AC excitation without performing full frequency-domain electrochemical impedance spectroscopy. **Methods:** the initial impedance response was segmented according to current polarity, normalized in the progress coordinate $p \in [0, 1]$, and averaged to obtain the impedance trend $Z(p)$. Three diagnostic indicators were extracted from this trend: the plateau mean value P , the plateau slope magnitude S , and the end-region deviation E . This representation makes it possible to replace the full impedance-response curve with a compact set of parameters suitable for subsequent regression processing. The relationship between these features and SOH was established using a quadratic regression model, with coefficients determined by the least squares method. **Results:** experimental validation on LIR2032 and NCR18650B cells showed that the P , E , and S indicators reflect changes in the level, shape, and end regions of the impedance trend during battery aging. For LIR2032, $R^2 = 0,9987$ with RMSE = 1,23 % was obtained; for NCR18650B, $R^2 = 0,9715$ with RMSE = 5,19 %. **Practical significance:** the proposed approach is characterized by low computational complexity and interpretable features and can be used as a basis for BMS algorithms and online diagnostics of battery systems. The method can be implemented without a significant increase in computational load and adapted to different types of lithium-ion cells after model calibration.

Keywords: impedance response, impedance trend, feature extraction, P/E/S indicators, SOH, online diagnostics, BMS, lithium-ion batteries

References

1. Wang Z., et al. Practical State Estimation Using Kalman Filter Methods for Large-Scale Battery Systems, *Applied Energy*, 2021, vol. 294, art. 117022. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.117022
2. Zhang Q., et al. State-of-Health Estimation of Batteries in an Energy Storage System Based on the Actual Operating Parameters, *Journal of Power Sources*, 2021, vol. 506, art. 230162. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2021.230162
3. Fan M., et al. State of Health Estimation of Lithium-Ion Battery Based on Electrochemical Impedance Spectroscopy, *Energies*, 2023, vol. 16, no. 8, art. 3393. DOI: 10.3390/en16083393
4. Borzenkov A.N., et al. Diagnostika sostoyaniya akkumulyatornoj batarei elektromobilya na osnove analiza krivoj Naikvista i impedansnoj spektroskopii [Diagnostics of the State of an Electric Vehicle Battery Based on Analysis of the Nyquist Curve and Impedance Spectroscopy], *Elektrotehnika [Electrical Engineering]*, 2026, no. 6, pp. 2–8. (In Russian)
5. Popov A.G., et al. Spektroskopiya elektrohimicheskogo impedansa litievyh istochnikov toka [Electrochemical Impedance Spectroscopy of Lithium Power Sources], *Trudy Moskovskogo*

fiziko-tekhnicheskogo instituta [Proceedings of the Moscow Institute of Physics and Technology], 2022, vol. 14, no. 1 (53), pp. 78–87. DOI: 10.53815/20726759_2022_14_1_78 (In Russian)

6. Xia Z., Abu Qahouq J.A. High Frequency Online Battery Impedance Measurement Method Using Voltage and Current Ripples Generated by DC-DC Converter, *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2020, pp. 1333–1338. DOI: 10.1109/APEC39645.2020.9124465

7. Yao Q., Lu D.-D.-C., Lei G. Accurate Online Battery Impedance Measurement Method with Low Output Voltage Ripples on Power Converters, *Energies*, 2021, vol. 14, no. 4, art. 1064. DOI: 10.3390/en14041064

8. Huang L., et al. Online Impedance Measurement of Operational Batteries Utilizing Sinc Function Signal Injection Via DC-DC Power Converter, *Measurement*, 2024, vol. 225, art. 114058. DOI: 10.1016/j.measurement.2023.114058

9. Shamarova N.A. Analiz metodov otsenki urovnya zaryada akkumulyatornykh batarej [Analysis of Methods for Assessing the State of Charge of Rechargeable Batteries], *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta [Bulletin of Kazan State Power Engineering University]*, 2022, vol. 14, no. 1 (53), pp. 24–33. (In Russian)

10. Borisov P.V., Vorobiev A.A. Obzor algoritma programmogo obespecheniya dlya diagnostiki ostatochnogo resursa litij-ionnykh akkumulyatornykh batarej tyagovogo podvizhnogo sostava [Review of Software Algorithm for Diagnostics of Residual Life of Lithium-Ion Batteries in Traction Rolling Stock], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya [Proceedings of Petersburg Transport University]*, 2023, vol. 20, iss. 2, pp. 471–477. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-471-477 (In Russian)

11. Khandorin M.M., Bukreev V.G. Metodika otsenki ostatochnoj emkosti litij-ionnoj akkumulyatornoj batarei pri izmenenii temperatury akkumulyatora [Method for Estimating the Residual Capacity of a Lithium-Ion Battery under Temperature Changes], *Doklady TUSUR [Reports of TUSUR University]*, 2017, vol. 20, no. 2, pp. 120–122. DOI: 10.21293/1818-0442-2017-20-2-120-122 (In Russian)

Received: April 22, 2026

Accepted: June 29, 2026

Author's information:

Zhenchao XI — Postgraduate Student; xizhenchao@foxmail.com

УДК 625.141

Определение параметров взаимодействия системы «щебень — георешетка»

Д. Н. Сомов¹, А. В. Петряев¹, Н. И. Тенирядко²

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

² Российский университет транспорта, Россия, 127055, Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9

Для цитирования: Сомов Д. Н., Петряев А. В., Тенирядко Н. И. Определение параметров взаимодействия системы «щебень — георешетка» // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 3. С. 138–154. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-138-154

Аннотация

Цель: экспериментальная оценка сдвиговой прочности и параметров интерфейсного взаимодействия системы «щебень — георешетка», а также установление влияния геометрических и механических характеристик георешеток на эффективность армирования щебеночного материала. **Методы:** исследование выполнено на основе крупномасштабных сдвиговых испытаний, проведенных с использованием лабораторной установки прямого сдвига. Испытания выполнялись для неармированного щебня и систем «щебень — георешетка» при различных уровнях нормальных напряжений. По результатам испытаний определялись коэффициент интерфейсного взаимодействия, параметры сдвиговой прочности (угол внутреннего трения и зацепление). Полученные данные сопоставлялись с геометрическими и механическими характеристиками исследуемых георешеток. **Результаты:** установлено, что применение георешеток приводит к изменению механизма сопротивления сдвигу щебня, выражающемуся в перераспределении составляющих сдвигового сопротивления. Значения коэффициента интерфейсного взаимодействия находятся в диапазоне 0,70–0,86 и зависят от типа и жесткости георешетки. Показано, что рост коэффициента взаимодействия коррелирует с увеличением толщины ребер и узлов, а также с повышением жесткости георешеток. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть использованы при выборе типа георешетки и назначении расчетных параметров армированных щебеночных оснований и балластных слоев железных дорог. Установленные зависимости между геометрическими параметрами георешеток и их армирующей эффективностью позволяют повысить обоснованность инженерных решений и уточнить расчетные модели взаимодействия «грунт — георешетка».

Ключевые слова: георешетка, железнодорожный балласт, щебень, балластная призма, армирование, сдвиговые испытания, интерфейсное взаимодействие, коэффициент взаимодействия, сдвиговая прочность, геосинтетические материалы

Введение

Георешетки широко применяются для армирования оснований, насыпей и железнодорожного балласта с целью повышения несущей способности и устойчивости железнодорожных сооружений за счет механического зацепления и перераспределения напряжений [1–3, 19]. Многочисленные экспериментальные исследования показали, что сдвиговая прочность интерфейса «грунт — георешетка» принципиально отличается от прочности контакта «грунт — грунт» и не может корректно описываться только внутренними прочностными характеристиками

грунта [1, 4, 11]. В ряде случаев интерфейсная прочность достигает или превышает прочность неармированного грунта, однако мобилизуется при значительно больших горизонтальных деформациях, что требует специального экспериментального определения параметров взаимодействия.

Основным инструментом для изучения границы раздела «грунт — георешетка» является прямое крупномасштабное испытание на сдвиг, позволяющее определить максимальное касательное напряжение и коэффициент взаимодействия поверхности раздела «грунт — георешетка», что широко используется в инженерных расчетах для усиления фундаментов и балластных слоев [5, 6, 18]. Использование стандартных малогабаритных сдвиговых устройств ограничено при исследовании крупнообломочных грунтов, поскольку они не могут обеспечить соотношение размера частиц и геометрии ячеек георешетки [1]. Использование крупногабаритного оборудования позволяет достоверно воспроизводить механическое взаимодействие частиц, в полной мере использовать поперечные ребра жесткости в процессе эксплуатации и отслеживать область сдвиговой деформации в условиях значительного смещения.

Этот метод становится незаменимым при использовании сыпучих материалов, таких как песчано-гравийные смеси и щебень [2–4, 17]. Условия проведения испытаний определены многими международными и национальными стандартами. Ключевым стандартом для оценки характеристик сдвига при контакте с геосинтетическими материалами является ASTM D5321 [12]. Он непосредственно ориентирован на использование устройств с большими размерами рабочей зоны [5]. Что касается эталонного значения прочности самого грунта (без армирования), то за основу здесь взят ASTM D3080 [13], в то время как метод ISO 12957-1 закреплен в практике зарубежных европейских лабораторий [14]. В нашей стране нормативной базой является ГОСТ Р71042-2023 [15] и ГОСТ 12248.1 [16]. Их использование обеспечивает корректное сравнение экспериментальных данных с мировыми аналогами, а масштабный коэффициент и модель приложения нагрузки, как показала практика, внесли существенные коррективы в итоговую зависимость [6–10].

Сдвиговая прочность интерфейса «грунт — георешетка» характеризуется пиковым и остаточным сопротивлением, отражающим различные стадии мобилизации механического зацепления и трения [1]. Пиковая прочность, как правило, достигается при существенно больших деформациях по сравнению с неармированным грунтом и связана с развитием сопротивления поперечных ребер и внутреннего сдвига грунта в пределах ячеек [3, 4, 20]. Для количественной оценки взаимодействия используется коэффициент R_{inter} , который определяется как отношение предельного касательного напряжения на контакте «грунт — материал» к касательному напряжению в массиве грунта и зависит от типа грунта, шероховатости контактной поверхности, нормального давления и величины

сдвиговых перемещений. Значения R_{inter} для песка, щебня и балласта обычно находятся в диапазоне 0,8–1,0 и могут превышать единицу при больших сдвиговых перемещениях [6, 11].

Формирование интерфейсной прочности обусловлено совокупным действием нескольких механизмов [21]. На начальной стадии сдвига доминирует механизм, связанный с трением частиц грунта о продольные ребра георешетки, интенсивность которого зависит от шероховатости и жесткости материала [1, 4]. При увеличении перемещений существенную роль начинает играть сопротивление поперечных ребер, обусловленное развитием локальных зон уплотнения и давления грунта [20]. Анализ полученных зависимостей позволяет утверждать, что доля такой составляющей в общем сопротивлении сдвигу варьируется в пределах 5–15 %, причем решающую роль здесь играют как поперечная жесткость ребер, так и их геометрические очертания [2, 9, 11]. Однако вклад георешетки этим не ограничивается. За счет внутренней перестройки грунта внутри отдельной ячейки обеспечивается дополнительное увеличение несущей способности. Этот процесс сопровождается влиянием расширения материала и последующим упрощением деформации [1, 12]. Результаты наблюдений показывают, что включение сетчатого армирующего слоя значительно расширяет область пластической деформации, вовлекая все новые и новые объемы заполнителей, что наиболее очевидно в плотных песчаных и гравийных массивах [4].

Когда речь заходит о факторах, определяющих эффект армирования, в первую очередь следует обратить внимание на размер частиц. Практика показала, что существует определенное оптимальное соотношение между характерным размером зерен D_{50} и расстоянием между ячейками, при котором коэффициент взаимодействия R_{inter} достигает своего максимального значения [8, 10, 12, 13]. Для песка этот показатель часто близок к нему или даже превышает его, в то время как для гравия и балластных материалов взаимодействие крупных фракций меньше, а застревание в ячейках хуже [3]. Также важна начальная плотность. В случае сильного уплотнения деформация сдвига обычно ограничивается узкой областью, прилегающей к контакту, и при значительном смещении прочность на границе раздела будет снижаться [11].

Отдельного обсуждения заслуживают негативные аспекты засорения крупнозернистых и мелкозернистых материалов. Этот эффект приводит к постепенному заполнению пустот решетки, препятствуя работе поперечных ребер, и в результате значительно снижается сопротивление сдвигу. Это наиболее опасно для балластного слоя железнодорожных путей, где потеря прочности, по оценкам, достигает 20–30 % [2, 3].

Что касается конструктивных характеристик самого армирующего элемента, то здесь был кардинально изменен тип георешетки. Трехосные модификации отличаются от двухосных тем, что они обеспечивают стабильность коэффициента

взаимодействия независимо от направления силы сдвига [12]. Жесткие варианты георешеток, в свою очередь, обеспечивают более высокие значения пикового сопротивления. Это связано с их способностью более полно мобилизовывать сопротивление грунта, чем гибкие аналоги [4].

В свою очередь, оказывают влияние условия проведения испытания. Нормальное давление, скорость сдвига и влажность образца существенно изменили форму диаграммы τ – δ , повлияв на пиковые и остаточные параметры. Особенностью взаимодействия с георешеткой является замедление пиковой интенсивности. Это достигается за счет довольно значительного горизонтального перемещения, что требует правильной интерпретации лабораторных данных при их переносе в практику проектирования армированных конструкций [1–3].

Исходя из изложенного, цель настоящей работы была сформулирована следующим образом: экспериментально оценить сдвиговые характеристики и параметры контактного взаимодействия в системе «щебень — георешетка» и выявить степень влияния геометрических и жесткостных параметров решетки на армирующую эффективность. Для достижения намеченной цели решались такие задачи:

1. Проведение серии крупномасштабных испытаний на прямой сдвиг для неармированного щебня и его моделей с георешеткой при варьировании нормального давления.

2. Вычисление коэффициента интерфейсного взаимодействия R_{inter} для каждой из исследуемых разновидностей георешеток.

3. Определение ключевых прочностных параметров (ϕ , c) как для исходного (неармированного), так и для усиленного щебеночного массива.

4. Анализ изменения механизма сопротивления сдвигу при введении георешеток.

5. Сопоставление экспериментальных результатов с геометрическими и механическими характеристиками георешеток и выявление определяющих факторов армирующей эффективности.

Экспериментальная часть

Материалы

В рамках настоящего исследования в качестве исследуемых материалов были использованы георешетки различного типа, а также крупнообломочный материал — щебень, применяемый на железной дороге.

Георешетки отличались по конструктивному исполнению, геометрическим параметрам ячеек и физико-механическим характеристикам, что позволило оценить влияние типа геосинтетического армирования на параметры сопротивления сдвигу [22]. В исследовании рассматривались как двухосные, так и трехосные георешетки, изготовленные из полимерных материалов, широко используемых в инженерной практике (табл. 1, 2).

ТАБЛИЦА 1. Сводная таблица геометрических характеристик георешеток

Показатель	Ед. изм.	TX 160	TX 170	TX 180	TX с большой ячейкой	TX с маленькой ячейкой	SS40
Размер ячейки (AD/AL)	мм	40	40	40	60	30	33
Размер ячейки (AT)	мм	40	40	40	60	30	33
Толщина ребра, продольная (tDR/tLR)	мм	1,8	2,3	2,6	3,0	1,3	2,2
Толщина ребра, поперечная (tTR)	мм	1,5	1,8	2,4	2,7	1,1	1,4
Ширина ребра, продольная (WDR/WLR)	мм	1,1	1,2	1,2	-	-	2,2
Ширина ребра, поперечная (WTR)	мм	1,3	1,3	1,3	-	-	2,5
Толщина узла (tJ)	мм	3,1	4,1	6,1	-	-	5,8
Форма ребра	—	Прямо-угольник	Прямо-угольник	Прямо-угольник	Прямо-угольник	Прямо-угольник	—
Форма ячейки	—	Треуголь-ник	Треуголь-ник	Треуголь-ник	Треуголь-ник	Треуголь-ник	Прямо-угольник

ТАБЛИЦА 2. Сводная таблица эксплуатационных характеристик

Показатель	Ед. изм.	TX 160	TX 170	TX 180	SS40
Прочность в узле	%	90	90	90	95
Стабильность ячейки (мин)	кг·см/г	3,9	6,1	7,2	13,6
Коэффициент изотропности жесткости	—	> 0,75	> 0,75	> 0,75	—
Радиальный модуль упругости/деформации (мин, при 0,5 %)	кН/м	505	580	735	450
Химическая устойчивость	%	100	100	100	—
Устойчивость к УФ-излучению	%	100	100	100	—
Повреждаемость при монтаже	%	< 13	< 13	< 13	—

В качестве зернистого заполнителя применялся щебень заданного фракционного состава с величиной частиц не более 30 мм (табл. 3). Так как предельный размер частиц грунта для испытания на данном сдвиговом оборудовании регламентирован производителем не более 10 % от длины каретки, которая составляет 300 мм.

ТАБЛИЦА 3. Фракционный состав испытуемого щебня

Размер ячейки сита, мм	Частный остаток, % по массе
25	52
20	28
10	12
5	8
Менее 5	—

Выбор указанных материалов обусловлен их широким применением в конструкциях транспортного строительства, а также необходимостью экспериментального обоснования их взаимодействия при действии сдвиговых нагрузок.

Оборудование для испытаний

Экспериментальные исследования проводились с использованием отдельно стоящего лабораторного аппарата прямого сдвига «Геотек» ГТ 1.2.15, общий вид которого представлен на рисунке.

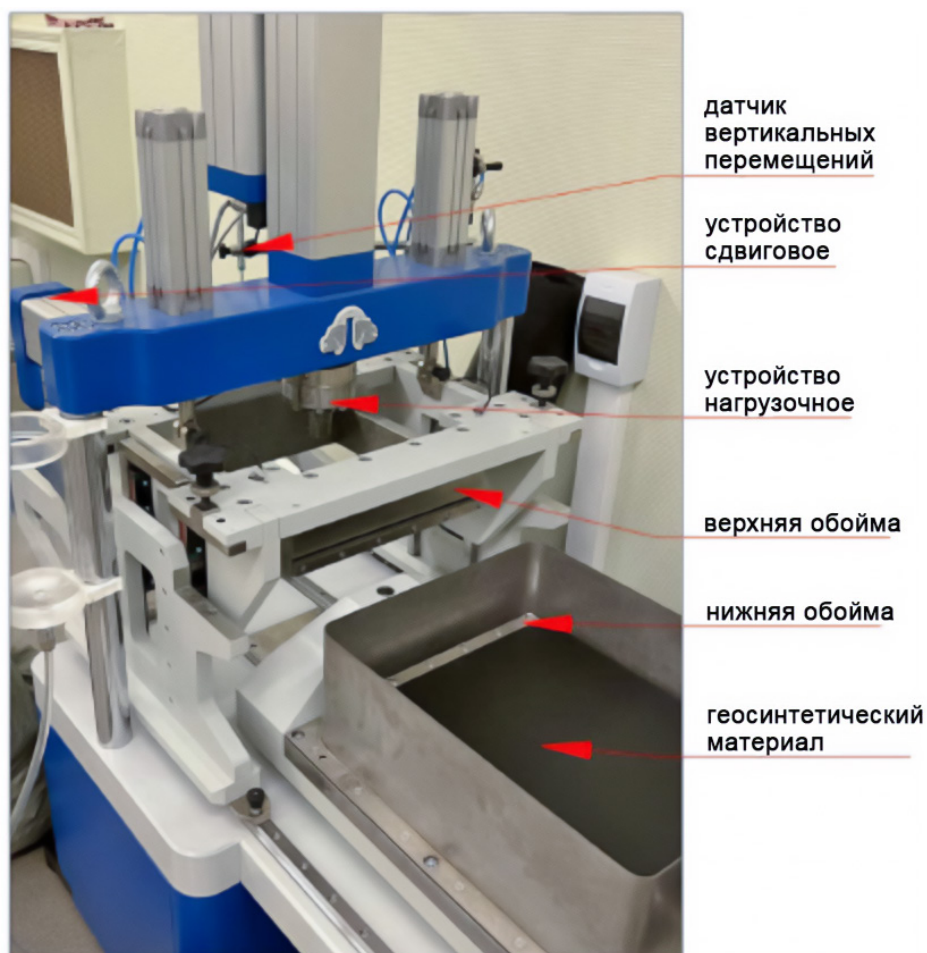


Рисунок. Сдвиговая установка ГТ 1.2.15. Фото Д. Н. Сомова

Данный комплекс предназначен для количественной оценки сопротивления грунтов сдвиговым деформациям и исследования контактного взаимодействия системы «грунт — геосинтетический материал». Установка имеет возможность одновременно фиксировать значения нормальных и сдвиговых напряжений с высокой точностью.

Комплекс состоит из двух обойм. Верхняя обойма размером 300×300 мм и глубиной 75 мм неподвижно закреплена; нижняя обойма, имеющая увеличенную площадь 375×300 мм и глубину 75 мм, подвижна для смещения нижней части грунтового массива относительно верхней. Дополнительно нижняя обойма имеет возможность крепления геосинтетика для проведения испытания системы «грунт — геосинтетический материал». Увеличение длины нижней обоймы обосновано предотвращением заклинивания частиц во время проведения испытания и для устранения краевых эффектов.

Проведение испытаний

Геосинтетические образцы подготавливались непосредственно из предоставленных производителем рулонных материалов. Размеры образцов геосинтетиков подбирались в соответствии с габаритами нижней зоны сдвига срезной камеры. Для размещения в нижней срезной коробке аппарата прямого сдвига образцы геосинтетических материалов вырезались размером 300×375 мм.

Сдвиговые испытания выполнялись при нескольких уровнях нормальных напряжений, а именно 50, 100 и 150 кПа, что позволило смоделировать различные условия эксплуатационной нагрузки, характерные для работы армированных грунтовых слоев в конструкциях транспортного назначения.

В соответствии с проверенной схемой образец подготавливался для испытания на сдвиг в месте контакта щебня с геосинтетическим материалом. Сначала нижнюю обойму заполняли слоем щебня и тщательно утрамбовывали. Георешетка крепилась на нижнюю обойму. Крепление осуществлялось жестко, чтобы во время эксперимента не происходило перемещения материала относительно корпуса устройства. Сборка компонентов и взаимное расположение образцов в подвижной и неподвижной частях камеры строго соблюдались в соответствии с требованиями стандарта ASTM D5321 [12], который конкретно определяет нормы проведения испытаний системы «грунт — геосинтетический материал».

В то же время, чтобы оценить эффект армирования, была проведена серия испытаний со щебнем без армирования георешеткой. Здесь уже использовался комбинированный подход. К американскому нормативу, регламентирующему сдвиговые испытания ASTM D3080 [13], был добавлен отечественный стандарт ГОСТ 12248.1 [16]. Это позволило корректно сравнить полученные показатели и количественно оценивать влияние георешетки на сопротивление, присущее самому заполнителю.

После того как образец был окончательно помещен в обе обоймы, поверх него устанавливался верхний нагрузочный штамп. После этого датчики горизонтального и вертикального перемещения приводились в рабочее положение и крепились к кронштейну с помощью винтовых соединений. Наконечник датчика горизонтального перемещения упирался в упорную пластину подвижной нижней обоймы сдвигающего устройства, в то время как наконечник датчика вертикального перемещения находился в контакте с упорной пластиной датчика усилия нагрузочного устройства. В процессе нагружения штоки датчиков выдвигались из корпусов, обеспечивая непрерывную регистрацию перемещений.

Скорость относительного смещения при сдвиге (Shear Displacement Rate, SDR) во всех испытаниях принималась равной 1 мм/мин в соответствии с требованиями ASTM D5321 [12]. Согласно рекомендациям ГОСТ 12248.1 [16], период предварительного уплотнения грунтового материала составлял 5 минут. Предполагалось, что указанное время уплотнения является достаточным для обеспечения полного зацепления контактирующих поверхностей грунта и геосинтетического материала.

По завершении стадии уплотнения между верхней и нижней срезными коробками формировался зазор порядка 30 мм, предотвращающий передачу паразитных усилий в начальной стадии сдвига. Перед началом основной фазы испытаний сдвиговое устройство проходило процедуру калибровки, после чего запускался режим сдвигового нагружения.

Во время испытания нижняя обойма сдвиговой установки двигалась с заданной постоянной скоростью относительно верхней обоймы. Данные, получаемые с датчиков силы и перемещений, сохранялись в автоматическом режиме.

Согласно требованиям ГОСТ 12248.1 [16], испытания проводились до достижения относительной деформации образца величиной 10 %.

Результаты исследования

По результатам лабораторных сдвиговых испытаний был определен коэффициент взаимодействия R_{inter} системы «грунт — георешетка» (1) для различных марок геоматериала. Как уже было сказано выше, данный коэффициент позволяет оценить способность геосинтетического материала взаимодействовать с грунтом за счет зацепления, трения и ограничения перемещений частиц грунта.

$$R_{inter} = \frac{\operatorname{tg}(\varphi)}{\operatorname{tg}(\varphi_c)}, \quad (1)$$

где $\operatorname{tg}(\varphi)$ — коэффициент трения при испытании на сдвиг системы «грунт — геосинтетический материал»;

$\operatorname{tg}(\varphi_c)$ — коэффициент трения при испытании на сдвиг системы «грунт — грунт».

Результаты испытаний представлены в табл. 4 как средние значения коэффициента взаимодействия для каждого типа георешетки. Данный коэффициент варьируется в пределах от 0,696 до 0,861.

ТАБЛИЦА 4. Значения коэффициента R_{inter}

Георешетка	50 кПа	100 кПа	150 кПа	Среднее R_{inter}
Triax 150	0,645	0,732	0,710	0,696
Triax 160	0,787	0,732	0,744	0,754
Triax 170	0,872	0,718	0,714	0,768
Triax 180	0,908	0,793	0,882	0,861
SS40	0,844	0,742	0,782	0,789
Triax (мелкая ячейка)	0,823	0,845	0,775	0,814
Triax (крупная ячейка)	0,901	0,789	0,828	0,839

Минимальное значение коэффициента взаимодействия было зафиксировано для георешетки TriAx 150 — 0,696. Результат связан с конструктивными особенностями данной георешетки: толщина ее ребер и узловых элементов вместе с низким значением радиального модуля упругости ниже по сравнению с другими марками георешеток. Эти низкие значения параметров ограничивают взаимодействие материала со щебнем и замедляют процесс формирования устойчивого массива.

Использование георешеток с более высокими конструктивными параметрами TriAx 160 и TriAx 170 дало прирост коэффициента взаимодействия на 8 и 10 % соответственно. Данный результат позволяет сделать вывод о том, что возрастание толщины ребер и жесткости узловых соединений ведет к большей устойчивости к сдвиговым деформациям.

Наибольший прирост относительно базовой георешетки продемонстрировала георешетка TriAx 180. 19 % роста эффективности является совокупностью взаимосвязанных факторов: усиленной геометрии узлов и ребер, а также наибольшего радиального модуля упругости среди всех георешеток TriAx. Совместное использование этих конструктивных решений формирует жесткий каркас, который надежно фиксирует фракции щебня в зоне сдвига. Версия георешеток с более крупными ячейками также показала высокое значение коэффициента взаимодействия, что подтверждает общую закономерность.

Значение коэффициента взаимодействия двухосной георешетки SS40 получилось приблизительно равным с трехосными георешетками средней жесткости. Но в отличие от них для двухосных георешеток большую роль играют геометрические характеристики, чем радиальный модуль упругости. Меньший размер ячеек и высокая стабильность сохраняют эффект фиксации щебеночной фракции.

На заключительном этапе, после обработки всех диаграмм сдвига, определялись прочностные параметры армированного массива: угол внутреннего трения φ и сцепление c . Эти значения рассчитаны для чистого щебня без армирования и для каждого варианта системы «щебень — георешетка». Все рассчитанные параметры приведены в табл. 5.

ТАБЛИЦА 5. Основные параметры прочности при сдвиге

Показатель	Без георешетки	TriAX 150	TriAX 160	TriAX 170	TriAX 180	SS40	TriAX мелкая	Triax крупная
φ , град.	51	47	40	33	46	41	41	42
c , кПа	82	50	70	90	72	73	79	79

Для неармированного щебня угол внутреннего трения φ составил 51° . Это значение, характерное для крупнообломочных материалов, где при сдвиге активно проявляется дилатансия и зерна имеют возможность свободно перекашиваться и перегруппировываться. Что касается сцепления c , то его значение составило 82 кПа.

Как только георешетка вводится в сдвиговую зону, прочностные параметры сразу начинают меняться. У всех испытанных типов георешеток угол внутреннего трения заметно снижается. Значения находятся в интервале от 33 до 47° . Это объясняется тем, что часть касательных напряжений теперь берет на себя георешетка и сопротивление сдвигу складывается не только из трения между частицами щебня, но и из работы самого геосинтетического каркаса, который ограничивает подвижность щебеночного массива. Происходит комплексная трансформация механизма сопротивления. Полученные данные показывают, что главным выигрышем от армирования является не рост определенного показателя, а создание жесткой пространственной структуры, где георешетка и крупнообломочный грунт начинают работать как единая система.

На заключительном этапе были сравнены результаты испытаний с геометрическими и жесткостными характеристиками каждого типа георешеток. Эта работа позволила выявить зависимости между конструктивными особенностями георешеток и их эффективностью в щебеночном массиве. Данные зависимости представлены в табл. 6. Необходимо уточнить, что вклад одного и того же геометрического параметра может проявляться по-разному в зависимости от того, какая георешетка будет использоваться (например, жесткая трехосная или гибкая двухосная). Механизм взаимодействия в каждом случае задействуется свой.

Если обратиться к трехосным типам георешеток, то здесь на первый план выходят три конструктивных параметра, играющие решающую роль: толщина продольных и поперечных ребер (tDR и tTR соответственно), толщина узловых соединений

(tJ) и радиальный модуль упругости материала. Между этими характеристиками и величиной коэффициента взаимодействия прослеживается прямая зависимость. Чем они выше, тем большее значение коэффициента взаимодействия будет зафиксировано. Это доказывает, что увеличение жесткости элементов георешетки улучшает ее взаимодействие со щебеночным заполнителем. Все наблюдаемые эффекты при изменении каждого из конструктивных параметров приведены в табл. 7.

ТАБЛИЦА 6. Сопоставление результатов сдвиговых испытаний

Тип георешетки	Ключевые геометрические параметры	Механические характеристики	Экспериментальный эффект при сдвиге
TriAx 150	Размер ячейки: 40×40 мм; толщина ребер: $tDR = 1,8$ мм; толщина узла: $tJ = 3,1$ мм	Радиальный модуль упругости — 505 кН/м	Низкий коэффициент взаимодействия (0,696), минимальное зацепление (50 кПа), ограниченное механическое зацепление
TriAx 160	Размер ячейки: 40×40 мм; $tDR = 2,3$ мм; $tJ = 4,1$ мм	Радиальный модуль — 580 кН/м	Рост коэффициента взаимодействия (0,754), более стабильная работа узлов
TriAx 170	Размер ячейки: 40×40 мм; $tDR = 2,6$ мм; $tJ = 4,1$ мм	Радиальный модуль — 580 кН/м	Коэффициент взаимодействия — 0,768
TriAx 180	Размер ячейки: 40×40 мм; $tDR = 2,6$ мм; $tJ = 6,1$ мм	Радиальный модуль — 735 кН/м	Максимальный коэффициент взаимодействия (0,861), высокое зацепление (72 кПа), эффективное ограничение деформаций
TriAx крупная	Увеличенная жесткость ребер и узлов	Повышенная структурная жесткость	Высокий коэффициент взаимодействия (0,839), устойчивое сопротивление сдвигу
SS40	Размер ячейки: 33×33 мм; толщина узла: $tJ = 5,8$ мм	Стабильность ячейки — 13,6 кг·см/г; радиальный модуль — 450 кН/м	Коэффициент взаимодействия — 0,789, рост зацепления — до 73 кПа, выраженный эффект блокировки зерен
Без георешетки	Отсутствие армирования	—	Минимальная сдвиговая устойчивость, отсутствие дополнительного зацепления

Необходимо учитывать, что все три конструктивных параметра действуют неразрывно. Совместное их увеличение дает больший прирост прочности, чем усиление каждого из них по отдельности. Увеличение толщины ребра и узлов делает георешетку более жесткой, что ведет к более надежной фиксации зерен щебня в каждой ячейке геоматериала. Это мешает фракциям свободнее перекатываться относительно друг друга, что ведет к более устойчивой конструкции массива. Геосинтетический материал принимает часть сдвигового давления, что приводит к росту коэффициента взаимодействия.

ТАБЛИЦА 7. Наблюдаемые эффекты при изменении конструктивных параметров

Конструктивный параметр	Наблюдаемый эффект
Увеличение толщины узлов, tJ	Рост коэффициента взаимодействия и сцепления за счет более жесткого каркаса
Увеличение толщины ребер, tDR , tTR	Повышение сопротивления сдвигу и снижение относительных деформаций
Уменьшение размера ячейки	Усиление эффекта блокировки щебня
Рост радиального модуля упругости	Более эффективная передача нагрузок и повышение устойчивости армированного слоя
Повышение стабильности ячейки	Сохранение геометрии при нагрузке и рост долговременной эффективности армирования

У двухосных георешеток определяющую роль играют геометрические параметры. Модули упругости у двухосных георешеток заметно ниже, чем у трехосных, и влияние таких геометрических параметров, как стабильность, размеры и форма ячеек, выходит на первый план. Как показали лабораторные испытания, коэффициент взаимодействия двухосной георешетки сопоставим с трехосными георешетками средней жесткости. Это объясняется тем, что меньшая по размеру ячейка плотнее заполняется щебнем и возникает эффект заклинивания, который сдерживает подвижность частиц грунта при сдвиговых деформациях. При этом георешетка сохраняет свою прочностную структуру.

Если сложить все полученные результаты, то можно сделать вывод, что на эффективность армирования щебеночного массива георешеткой всегда влияет комплекс факторов. Для трехосных георешеток это жесткость узлов и толщина ребер, а для двухосных георешеток — размер и стабильность ячейки в грунтовом массиве. Лабораторные испытания показали, что оба подхода эффективно обеспечивают схожие значения коэффициента взаимодействия, однако необходимо учитывать различие в физических механизмах данных подходов при проектировании реальных конструкций.

Выводы

Проведенные испытания показали значительное влияние георешетки на процесс сопротивления щебеночного массива сдвиговым деформациям. Данное сопротивление формируется за счет трения частиц щебня между собой, зацепления частиц грунта с ребрами георешетки и ограничения перемещений частиц в ячейке.

Экспериментально было установлено, что коэффициент взаимодействия системы «щебень — георешетка» находится в диапазоне от 0,696 до 0,861, на что влияют тип и конструктивные характеристики георешетки.

По сравнению с неармированным щебнем уменьшение угла трения во всех армированных образцах является результатом физического взаимодействия.

При введении георешетки траектория зоны сдвига изменяется и объем щебеночно-го материала, который участвует в процессе сдвига, увеличивается, а часть усилия сдвига уменьшается не только за счет трения между частицами щебня, но и из-за присутствия геосинтетических материалов.

Эффективность армирования определяется совокупностью геометрических и жесткостных характеристик. В случае трехосных георешеток толщина и радиальный модуль упругости узловых соединений играют более важную роль. Их рост увеличивает коэффициент взаимодействия. Для двухосных георешеток важнее размер элемента и способность сохранять свою форму под нагрузкой.

Таким образом, между конструктивными параметрами георешетки и механизмом ее взаимодействия со щебнем существует связь из трех составляющих: сопротивления на интерфейсе «щебень — георешетка», сопротивления, создаваемого поперечными ребрами, и взаимодействия фракций щебня в ячейках. Именно эти механизмы определяют, насколько эффективно будет работать георешетка в конкретных условиях, а подбор геометрических и жесткостных характеристик должен быть определяющим при выборе необходимого типа и марки георешетки для использования в реальной конструкции.

Список источников

1. Liu C. N., Ho Y. H., Huang J. W. Large-Scale Direct Shear Tests of Soil–Geogrid Interfaces // *Geotextiles and Geomembranes*. 2009. Vol. 27, no. 1. Pp. 19–30.
2. Indraratna B., Ngo N. T., Rujikiatkamjorn C. Behaviour of Geogrid-Reinforced Ballast under Shear and Cyclic Loading // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2011. no. 29. Pp. 313–322.
3. Ngo N. T., Indraratna B., Ferreira F. B. Influence of Fouling on the Shear Behaviour of Ballast–Geogrid Interfaces // *Soils and Foundations*. 2018. Vol. 58, no. 4. Pp. 931–943.
4. Ngo N. T., Indraratna B., Rujikiatkamjorn C. Direct Shear Behaviour of Soil–Geogrid Interfaces // *Geotextiles and Geomembranes*. 2016. Vol. 44, no. 4. Pp. 523–535.
5. Interface Shear Behaviour of Sand–Geogrid Systems at Large Displacements / J. Stacho [et al.] // *Geotechnical Testing Journal*. 2020. Vol. 43, no. 6. Pp. 1516–1530.
6. Interface Shear Strength of Geogrid–Soil Systems Under Different Moisture Conditions / C. N. Liu [et al.] // *Geotextiles and Geomembranes*. 2019. Vol. 47, no. 5. Pp. 676–688.
7. The Effect of Relative Density, Granularity and Size of Geogrid Apertures on the Shear Strength of the Soil / Geogrid Interface / A. Lakirouhani [et al.] // *Journal of Civil Engineering and Management*. 2024. Vol. 30, no. 8. Pp. 691–707.
8. Anisotropic Shear Behaviour of Soil–Geogrid Interfaces / J. Zhang [et al.] // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 301, no. 11 (23). Art. 11387.
9. Large-Scale Direct Shear Testing for Assessing Interfacial Parameters of Natural and Recycled Sand with Geosynthetic Reinforcements / V. Kommanamanchi [et al.] // *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 442. Art. 137598.

10. Venkateswarlu H., Saikumar A., Latha G. M. Sand–Geogrid Interfacial Shear Response Revisited Through Additive Manufacturing // *Geotextiles and Geomembranes*. 2023. Vol. 51, no. 4. Pp. 95–107.
11. Palmeira E. M. Soil–geosynthetic interaction: modelling and analysis // *Geotextiles and Geomembranes*. 2009. Vol. 27, no. 5. Pp. 368–390.
12. ASTM D5321/D5321M-26. Standard Test Method for Determining the Shear Strength of Soil-Geosynthetic and Geosynthetic-Geosynthetic Interfaces by Direct Shear. ASTM International. West Conshohocken. PA. 2026. URL: https://www.astm.org/d5321_d5321m-26.html. DOI: 10.1520/D5321_D5321M-26
13. ASTM D3080/D3080M-23. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. ASTM International. West Conshohocken. PA. 2023. URL: https://www.astm.org/d3080_d3080m-23.html. DOI: 10.1520/D3080_D3080M-23
14. ISO 12957-1:2018, Geosynthetics — Determination of Friction Characteristics. Part 1: Direct Shear Test. International Organization for Standardization. Geneva, 2018. URL: <https://www.iso.org/standard/69498.html>
15. ГОСТ Р 71042-2023. Материалы геосинтетические. Методы лабораторных испытаний. М.: Стандартинформ, 2023.
16. ГОСТ 12248-2020. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности. М.: Стандартинформ, 2020.
17. Сомов Д. Н., Игошев И. С., Петряев А. В. Апробация методики сдвиговых испытаний геосинтетического композита «КАПЛАМ» // *Бюллетень результатов научных исследований*. 2024. № 3. С. 114–127. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-03-114-127. EDN WLCBYZ
18. Татьянников Д. А., Пономарев А. Б., Клевеко В. И. Определение характеристик трения для двух типов геосинтетических материалов путем проведения испытаний на сдвиг // *Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура*. 2014. № 1. С. 174–186.
19. Применение геосинтетических материалов для повышения несущей способности грунтовых подушек / С. Ж. Джумадилова [и др.] // *Нанотехнологии в строительстве*. 2024. Т. 16, № 4. С. 342–354. DOI: 10.15828/2075-8545-2024-16-4-342-354. EDN KBXJDR
20. Игнатъев А. А., Чижиков И. А. Оценка повреждаемости и заклинивающей способности инновационной 3D-георешетки на границе раздела слоев «песок — щебень» // *Строительство: наука и образование*. 2025. № 3. С. 141–157. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.9
21. Казаков М. С., Офрихтер В. Г. Характеристики взаимодействия геосинтетического материала с песчаным грунтом при испытании на вытягивание // *Известия КГАСУ*. 2025. № 4 (74). С. 19–29. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/74.2. EDN ANQRMZ
22. Артемьев В. В., Бессараб Г. А. Влияние армирования щебеночных материалов георешеткой на воздействие сдвиговых нагрузок // *Лесотехнический журнал*. 2017. № 4. С. 127–133. DOI: 10.12737/23445

Дата поступления: 04.07.2026

Решение о публикации: 14.08.2026

Контактная информация:

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

ПЕТРЯЕВ Андрей Владимирович — доктор техн. наук, старший научный сотрудник кафедры «Строительство дорог транспортного комплекса»; pgups60@mail.ru

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

Determination of the Parameters of the Interaction of the Crushed Stone-Geogrid System

D. N. Somov¹, A. V. Petryaev¹, N. I. Teniryadko²

¹ Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

² Russian University of Transport, bldg. 9, 9 Obraztsova st., Moscow, 127994, Russia

For citation: Somov D. N., Petryaev A. V., Teniryadko N. I. Determination of the Parameters of the Interaction of the Crushed Stone-Geogrid System // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 3, pp. 138–154. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-138-154 (In Russian)

Abstract

Objective: the purpose of the work is to experimentally evaluate the shear strength and interface parameters of the crushed stone–geogrid system, as well as to establish the influence of geometric and mechanical characteristics of geogrids on the effectiveness of reinforcement of crushed stone material. **Methods:** the study was performed on the basis of large-scale shear tests conducted using a direct shear laboratory installation. The tests were performed for non-reinforced crushed stone and “crushed stone–geogrid” systems at various levels of normal voltages. According to the test results, the coefficient of interface interaction and the parameters of shear strength (angle of internal friction and engagement) were determined. The data obtained were compared with the geometric and mechanical characteristics of the studied geogrids. **Results:** it was found that the use of geogrids leads to a change in the mechanism of resistance to the displacement of crushed stone, which is expressed by the redistribution of the components of shear resistance. The values of the interface interaction coefficient are in the range of 0,70–0,86 and depend on the type and rigidity of the geogrid. It is shown that an increase in the interaction coefficient correlates with an increase in the thickness of the edges and nodes, as well as with an increase in the rigidity of the geogrids. **Practical significance:** the results obtained can be used in selecting the type of geogrid and assigning the design parameters of reinforced crushed stone foundations and ballast layers of railways. The established relationships between the geometric parameters of geogrids and their reinforcing efficiency make it possible to increase the validity of engineering solutions and refine the computational models of the “ground–geogrid” interaction.

Keywords: geogrid, railway ballast, crushed stone, ballast prism, reinforcement, shear testing, interface interaction, interaction coefficient, shear strength, geosynthetic materials

References

1. Liu C. N., Ho Y. H., Huang J. W. Large-Scale Direct Shear Tests of Soil–Geogrid Interfaces, *Geotextiles and Geomembranes*, 2009, vol. 27, no. 1, pp. 19–30.

2. Indraratna B., Ngo N. T., Rujikiatkamjorn C. Behaviour of Geogrid-Reinforced Ballast under Shear and Cyclic Loading, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, no. 29, pp. 313–322.
3. Ngo N. T., Indraratna B., Ferreira F. B. Influence of Fouling on the Shear Behaviour of Ballast–Geogrid Interfaces, *Soils and Foundations*, 2018, vol. 58, no. 4, pp. 931–943.
4. Ngo N. T., Indraratna B., Rujikiatkamjorn C. Direct Shear Behaviour of Soil–Geogrid Interfaces, *Geotextiles and Geomembranes*, 2016, vol. 44, no. 4, pp. 523–535.
5. Stacho J., et al. Interface Shear Behaviour of Sand–Geogrid Systems at Large Displacements, *Geotechnical Testing Journal*, 2020, vol. 43, no. 6, pp. 1516–1530.
6. Liu C. N., et al. Interface Shear Strength of Geogrid–Soil Systems Under Different Moisture Conditions, *Geotextiles and Geomembranes*, 2019, vol. 47, no. 5, pp. 676–688.
7. Lakirouhani A., et al. The Effect of Relative Density, Granularity and Size of Geogrid Apertures on the Shear Strength of the Soil / Geogrid Interface, *Journal of Civil Engineering and Management*, 2024, vol. 30, no. 8, pp. 691–707.
8. Zhang J., et al. Anisotropic Shear Behaviour of Soil–Geogrid Interfaces, *Construction and Building Materials*, 2021, vol. 301, no. 11 (23), art. 11387.
9. Kommanamanchi V., et al. Large-Scale Direct Shear Testing for Assessing Interfacial Parameters of Natural and Recycled Sand with Geosynthetic Reinforcements, *Construction and Building Materials*, 2024, vol. 442, art. 137598.
10. Venkateswarlu H., Saikumar A., Latha G. M. Sand–Geogrid Interfacial Shear Response Revisited Through Additive Manufacturing, *Geotextiles and Geomembranes*, 2023, vol. 51, no. 4, pp. 95–107.
11. Palmeira E. M. Soil–Geosynthetic Interaction: Modelling and Analysis, *Geotextiles and Geomembranes*, 2009, vol. 27, no. 5, pp. 368–390.
12. ASTM D5321/D5321M-26. Standard Test Method for Determining the Shear Strength of Soil-Geosynthetic and Geosynthetic-Geosynthetic Interfaces by Direct Shear, ASTM International. West Conshohocken, PA, 2026. URL: https://www.astm.org/d5321_d5321m-26.html. DOI: 10.1520/D5321_D5321M-26
13. ASTM D3080/D3080M-23. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2023. URL: https://www.astm.org/d3080_d3080m-23.html. DOI: 10.1520/D3080_D3080M-23
14. ISO 12957-1:2018, Geosynthetics — Determination of Friction Characteristics. Part 1: Direct Shear Test. International Organization for Standardization, Geneva, 2018. URL: <https://www.iso.org/standard/69498.html>
15. GOST R 71042-2023. Materialy geosinteticheskie. Metody laboratornykh ispytaniy [Geosynthetic Materials. Methods of Laboratory Testing], Moscow, Standartinform, 2023. (In Russian)
16. GOST 12248-2020. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya kharakteristik prochnosti [Soils. Methods for Laboratory Determination of Strength Characteristics], Moscow, Standartinform, 2020. (In Russian)

17. Somov D. N., Igoshev I. S., Petryaev A. V. Aprobatsiya metodiki sdvigovykh ispytaniy geosinteticheskogo kompozita “KAPLAM” [Validation of the Shear Testing Method for the Geosynthetic Composite “KAPLAM”], *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy [Bulletin of Scientific Research Results]*, 2024, no. 3, pp. 114–127. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-03-114-127. EDN WLCBYZ (In Russian)
18. Tat'yannikov D. A., Ponomarev A. B., Kleveko V. I. Opredelenie kharakteristik treniya dlya dvukh tipov geosinteticheskikh materialov putem provedeniya ispytaniy na sdvig [Determination of Friction Characteristics for Two Types of Geosynthetic Materials via Shear Testing], *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arkhitektura [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Construction and architecture]*, 2014, no. 1, pp. 174–186. (In Russian)
19. Dzhumadilova S. Zh., et al. Primenenie geosinteticheskikh materialov dlya povysheniya nesushchey sposobnosti gruntovykh podushek [Application of Geosynthetic Materials to Improve the Bearing Capacity of Soil Bases], *Nanotekhnologii v stroitel'stve [Nanotechnologies in Construction]*, 2024, vol. 16, no. 4, pp. 342–354. DOI: 10.15828/2075-8545-2024-16-4-342-354. EDN KBXJDR (In Russian)
20. Ignat'ev A. A., Chizhikov I. A. Otsenka povrezhdaemosti i zaklinivayushchey sposobnosti innovatsionnoy 3D-georeshetki na granitse razdela sloyov “pesok — shcheben” [Assessment of Damageability and Wedging Ability of an Innovative 3D Geogrid at the Sand–Crusher Run Interface], *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie [Construction: Science and Education]*, 2025, no. 3, pp. 141–157. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.9 (In Russian)
21. Kazakov M. S., Ofrikhter V. G. Kharakteristiki vzaimodeystviya geosinteticheskogo materiala s peschanyim gruntom pri ispytanii na vytyagivanie [Characteristics of Geosynthetic Material Interaction with Sandy Soil in PullOut Testing], *Izvestiya KGASU [News of the Kazan State University of Architecture and Engineering]*, 2025, no. 4 (74), pp. 19–29. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/74.2. EDN ANQRMZ (In Russian)
22. Artem'ev V. V., Bessarab G. A. Vliyanie armirovaniya shchebenochnykh materialov georeshetkoy na vozddeystvie sdvigovykh nagruzok [Influence of Geogrid Reinforcement of Crushed Stone Materials on Shear Load Effects], *Lesotekhnicheskii zhurnal [Forest Engineering Journal]*, 2017, no. 4, pp. 127–133. DOI: 10.12737/23445 (In Russian)

Received: July 07, 2026

Accepted: August 14, 2026

Author's information:

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

Andrej V. PETRYAEV — Dr. Sci. in Engineering, Senior Researcher at the “Road Construction of the Transport Complex” Department; pgups60@mail.ru

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

УДК 528.8

О факторах, влияющих на точность формирования изображений

Е. В. Козин

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

Для цитирования: Козин Е. В. О факторах, влияющих на точность формирования изображений // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 3. С. 155–164. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-155-164

Аннотация

Цель: в настоящей статье автор исследует, как основные физические факторы, возникающие в процессе аэрокосмической съемки участка местности, влияют на точность определения координат точек (объектов) местности. Для решения задачи устранения влияния этих факторов, как правило, применяется аналитический фотограмметрический подход определения поправок (приращений) в соответствующие координаты точек местности снимков. **Методы:** в качестве основных методов учета и устранения основных факторов, влияющих на точность формирования изображений, предлагается применять аналитические фотограмметрические методы обработки изображений, полученных в процессе аэрокосмической съемки, в том числе методы проективной геометрии. **Результаты:** устранение основных факторов, влияющих на точность формирования изображений, производится путем ввода соответствующих поправок в соответствующие координаты точек местности, измеренных на снимках с применением высокоточных фотограмметрических систем и программных комплексов. Поправки (приращения координат), определенные с помощью аналитических выражений вычисления приращений координат точек местности, распознаваемых на изображениях, вводятся в измеренные координаты точек местности. **Практическая значимость:** применяемая в настоящее время практика фотограмметрической обработки изображений (снимков), проводимые научные исследования и эксперименты доказывают, что для повышения точности определения координат на аэрокосмическом изображении (снимке) необходимо учитывать поправки (приращения) в соответствующие координаты точек, вызванные влиянием кривизны подстилающей поверхности Земли, атмосферной рефракции, дисторсии оптической системы применяемой аппаратуры наблюдения.

Ключевые слова: точка, поверхность, смещение точки, координата, изображение, снимок

Введение

Анализ современных отечественных и зарубежных исследований по предлагаемой теме демонстрирует, что для повышения точности определения плоских (пиксельных) координат точек местности на снимках, которые получены в процессе аэрокосмической съемки участка местности, проведенной с достаточно больших высот полета, необходим учет погрешностей, вызванных в том числе некоторыми физическими факторами. Поэтому учет и устранение влияния этих факторов повышают информативность снимков, получаемых в процессе аэрокосмической съемки местности. В настоящей статье предлагается рассмотреть влияние некоторых физических факторов, связанных с особенностями влияния земной поверхности, атмосферной рефракции, а также дисторсии объектива применяемой бортовой аппаратуры наблюдения.

Влияние кривизны Земли на положение изображения точки на снимке

Для упрощения математических выражений при определении координат точек местности в фотограмметрической системе координат $SXYZ$ по измеренным координатам их изображений предполагается, что земная поверхность является плоской. Однако при увеличении высоты съемки и мгновенного поля зрения оптической системы это предположение приводит к возникновению больших погрешностей в определении координат точек местности, обуславливаемых кривизной земной поверхности. Для анализа этих погрешностей предлагается рассмотреть влияние кривизны земной поверхности по сравнению с плоской поверхностью на положение точек на снимке [1]. Предположим, что земная поверхность представляет собой поверхность шара, а снимок является горизонтальным (рис. 1).

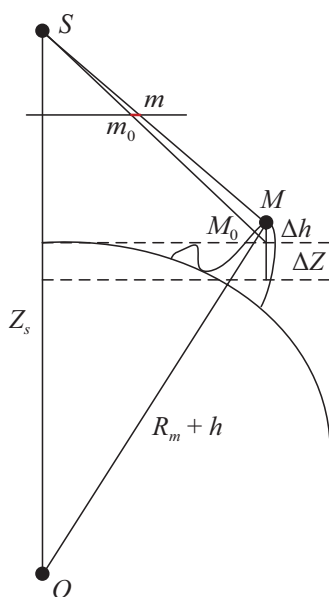


Рис. 1. Смещение (сдвиг) изображения точки на снимке, вызванное влиянием кривизны Земли

Для определения приращений (погрешностей) плоских прямоугольных координат точек снимка, вызванных влиянием кривизны Земли, предлагается воспользоваться известными в классической фотограмметрии аналитическими выражениями связи пространственных координат и измеренных плоских прямоугольных координат точки (объекта) на снимке [2, 3]:

$$x = \frac{a_{11}X + a_{21}Y + a_{31}(Z - Z_s)}{a_{13}X + a_{23}Y + a_{33}(Z - Z_s)}, \quad y = \frac{a_{12}X + a_{22}Y + a_{32}(Z - Z_s)}{a_{13}X + a_{23}Y + a_{33}(Z - Z_s)}, \quad (1)$$

где X, Y, Z — геоцентрические пространственные координаты точки M на земной поверхности;

X_s, Y_s, Z_s — линейные элементы внешнего ориентирования, определяющие положения точки съемки (центра проектирования) S в пространстве;

$a_{11} \dots a_{33}$ — направляющие косинусы вектора луча визирования в системе координат применяемой камеры (сенсора, бортовой аппаратуры наблюдения) [4]. Для этого на первом этапе логарифмируют обе части уравнений:

$$\begin{aligned}\ln x &= \ln(a_{11}X + a_{21}Y + a_{31}(Z - Z_S)) - \ln(a_{13}X + a_{23}Y + a_{33}(Z - Z_S)), \\ \ln y &= \ln(a_{12}X + a_{22}Y + a_{32}(Z - Z_S)) - \ln(a_{13}X + a_{23}Y + a_{33}(Z - Z_S)).\end{aligned}\quad (2)$$

На втором этапе получают производные функции формул (2) по координатам x и y (приращения координат Δx , Δy) [5]:

$$\begin{aligned}\Delta x &= x \left(\frac{a_{11}\Delta X + a_{21}\Delta Y + a_{31}\Delta Z}{a_{11}X + a_{21}Y + a_{31}(Z - Z_S)} - \frac{a_{13}\Delta X + a_{23}\Delta Y + a_{33}\Delta Z}{a_{13}X + a_{23}Y + a_{33}(Z - Z_S)} \right), \\ \Delta y &= y \left(\frac{a_{12}\Delta X + a_{22}\Delta Y + a_{32}\Delta Z}{a_{11}X + a_{21}Y + a_{31}(Z - Z_S)} - \frac{a_{13}\Delta X + a_{23}\Delta Y + a_{33}\Delta Z}{a_{13}X + a_{23}Y + a_{33}(Z - Z_S)} \right).\end{aligned}\quad (3)$$

Зная, что:

$$\begin{aligned}\Delta X &= X \frac{\Delta h}{R_M + h}; \\ \Delta Y &= Y \frac{\Delta h}{R_M + h}; \\ \Delta Z &= Z \frac{\Delta h}{R_M + h},\end{aligned}\quad (4)$$

выражения (3) принимают вид:

$$\begin{aligned}\Delta x &= x \frac{\Delta h}{R_M + h} \left(\frac{a_{21}}{a_{11}X + a_{21}Y + a_{31}(Z - Z_S)} - \frac{a_{23}}{a_{13}X + a_{23}Y + a_{33}(Z - Z_S)} \right), \\ \Delta y &= y \frac{\Delta h}{R_M + h} \left(\frac{a_{22}}{a_{11}X + a_{21}Y + a_{31}(Z - Z_S)} - \frac{a_{23}}{a_{13}X + a_{23}Y + a_{33}(Z - Z_S)} \right).\end{aligned}\quad (5)$$

После элементарных математических преобразований формулы (5) приращения плоских координат точки принимают следующий вид:

$$\begin{aligned}\Delta x &= -q \frac{\Delta h}{R_M + h} (a_{21} - xa_{23}), \\ \Delta y &= -q \frac{\Delta h}{R_M + h} (a_{22} - ya_{23}),\end{aligned}\quad (6)$$

$$\text{где } q = \frac{1}{a_{13}X + a_{23}Y + a_{33}(Z - Z_S)}.$$

Результирующее линейное смещение изображения точки на снимке Δl вычисляется по формуле:

$$\Delta l = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (7)$$

или

$$\Delta l = \sqrt{\left[-q \frac{\Delta h}{R_M + h} (a_{21} - x a_{23})\right]^2 + \left[-q \frac{\Delta h}{R_M + h} (a_{22} - y a_{23})\right]^2}. \quad (8)$$

Для точки центра проекции на снимке формула (8) принимает вид:

$$|\Delta l_0| = q \frac{\Delta h}{R_m + h} \sqrt{1 - a_{23}^2}. \quad (9)$$

На основании анализа вышеуказанных аналитических выражений можно сделать вывод, что смещение изображения точки в центре снимка Δl не зависит от угла его поворота относительно оптико-электронной системы наблюдения. Более того, при известных значениях линейных и угловых элементов внешнего ориентирования, а также модели подстилающей поверхности можно рассчитать значения данных погрешностей по всей площади снимка.

Современные научные исследования показывают, что отклонение изображения точки на горизонтальном снимке вследствие кривизны земной поверхности зависит от ряда факторов, включая высоту съемки, расстояние от точки до центра снимка и фокусное расстояние объектива [6, 7].

Влияние атмосферной рефракции на положение изображения точки на снимке

Из научных исследований известно, что атмосфера представляет собой очень сложную неоднородную среду, показатель преломления которой изменяется с изменением высоты съемки. Съемка подстилающей поверхности выполняется через толщу атмосферы, что вызывает сложности различного характера: влияние облачности, поглощение лучей определенных длин волн атмосферой, рассеивание лучей и влияние атмосферной дымки [8, 9]. Это свойство атмосферы изменяет траекторию светового (проектирующего) луча. В научной среде это явление называется атмосферной рефракцией¹. Данное обстоятельство приводит к линейному сдвигу изображения точки на снимке относительно его истинного положения в случае прямолинейного распространения проектирующего луча (рис. 2).

¹ Атмосферной рефракцией называется искривление траектории оптического луча при прохождении через среду переменной плотности.

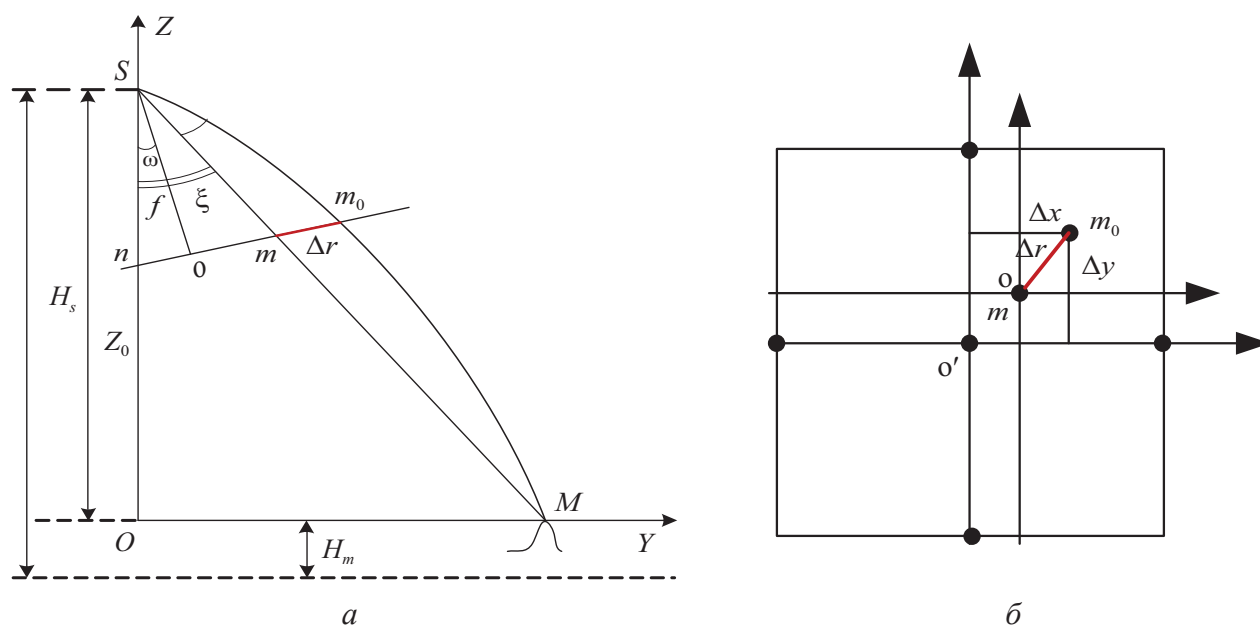


Рис. 2. Влияние атмосферной рефракции на линейный сдвиг изображения точки:

a — в пространстве, *б* — на снимке

Для определения линейного смещения изображения точки на снимке вследствие влияния атмосферной рефракции Δr применяется аналитическое выражение:

$$\Delta r = f[1 + \operatorname{tg}^2(\xi - \omega)] \cdot 2,332 \cdot 10^{-3} \frac{\operatorname{tg} \xi}{H_s} e^{-0,1423 H_m}, \quad (10)$$

где Δr — линейное смещение изображения точки на снимке вследствие влияния атмосферной рефракции;

H_s, H_m — абсолютные высоты точек съемки и местности над уровнем Балтийского моря, км;

ω — угол наклона снимка;

ξ — угол смещения луча визирования от надира;

f — фокусное расстояние применяемой камеры.

Анализ формулы (10) показывает, что из-за влияния атмосферной рефракции изображение точки на снимке не смещается только в точке надира (n). В этом случае траектория светового луча не корректируется ($\xi = 0$). Во всех остальных случаях по мере увеличения угла ξ линейное смещение изображения точки на снимке, вызванное атмосферной рефракцией, возрастает.

Приращения плоских координат изображения точки на снимке, вызванные атмосферной рефракцией, вычисляются с помощью следующих аналитических формул:

$$\begin{aligned} \Delta x &= \Delta r \cdot \cos \varphi, \\ \Delta y &= \Delta r \cdot \sin \varphi, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\varphi = \arctg \left(\frac{y - y_n}{x - x_n} \right). \quad (12)$$

где φ — угол, составленный радиусом-вектором с осью x ,

x_n и y_n — плоские прямоугольные координаты точки надира n .

Исследование формул (11) и (12) позволяет установить, что для определения приращений координат изображения точки на снимке (Δx , Δy), вызванных влиянием атмосферной рефракции, необходимо более точно измерять плоские прямоугольные координаты определяемой точки, точки надира. Как правило, измерение плоских прямоугольных координат выполняется с применением высокоточных фотограмметрических приборов (систем) либо в современных программных средах обработки аэрокосмических изображений.

Влияние дисторсии объектива применяемой бортовой аппаратуры наблюдения на положение изображения точки на снимке

Из теории известно, что дисторсия оптической системы приводит к отклонению проектирующих лучей. Это искажение (сдвиг) в оптической системе вызывает линейное смещение положения изображения точки на снимке (Δd). Смещение становится более значительным по мере удаления от центра кадра. В результате изображение объекта (предмета) на снимке искажается и становится геометрически не подобным оригиналу.

После анализа возникновения линейного сдвига изображения точки на снимке, вызванного дисторсией объектива, необходимо отметить, что смещение положения точки на изображении от идеального происходит в общем случае не только по оси ординат, но и по оси абсцисс на величины приращений плоских координат Δx , Δy .

Экспериментально доказано: дисторсия характеризуется тем, что ее величина нелинейно зависит от величины предмета, то есть линейное увеличение различно для разных точек поля снимка. На рис. 3 приводится пример смещения (сдвига) изображения точки по оси ординат.

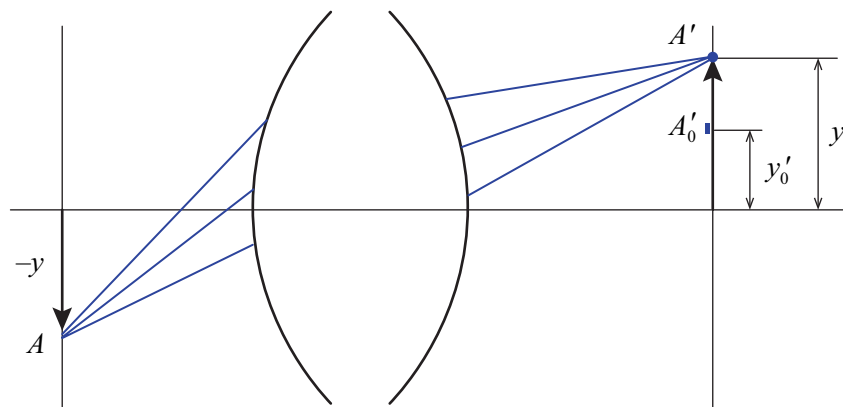


Рис. 3. Линейный сдвиг изображения точки на снимке, вызванный дисторсией объектива по оси ординат

Как правило, на практике в процессе фотограмметрической обработки применяются аналитические выражения для вычисления приращений плоских координат изображения точки на снимке Δx_i и Δy_i :

$$\Delta d = \varepsilon d^3, \Delta x = \varepsilon x d^2, \Delta y = \varepsilon y d^2 \text{ (общий вид)}, \quad (13)$$

или

$$\begin{aligned} \Delta d_1 &= \varepsilon d_1^3, & \Delta x_1 &= \varepsilon x_1 d_1^2, \\ \Delta d_2 &= \varepsilon d_2^3, & \Delta x_2 &= \varepsilon x_2 d_2^2, \\ \dots\dots\dots, & \dots\dots\dots, \\ \Delta d_i &= \varepsilon d_i^3, & \Delta x_i &= \varepsilon x_i d_i^2, \end{aligned} \quad (14)$$

где d_i — измеренное расстояние от определяемой точки до главной точки снимка;
 x_i, y_i — измеренные плоские прямоугольные координаты определяемой точки снимка;

ε — коэффициент дисторсии оптической системы.

Проведенный анализ аналитических выражений (14) позволяет сделать следующие выводы о влиянии дисторсии оптической системы бортовой аппаратуры наблюдения на нарушение геометрического подобия объекта (предмета) на снимке:

1. В случае смещения Δd точки от центра снимка изображение объекта принимает подушкообразную форму (положительная дисторсия $\varepsilon \geq 0$).

2. В случае смещения Δd точки к центру снимка изображение объекта принимает бочкообразную форму (отрицательная дисторсия, $\varepsilon \leq 0$).

В качестве примера приведены два варианта искаженного изображения квадрата (объекта) при наличии в оптической системе бортовой аппаратуры положительной и/или отрицательной дисторсии [10].

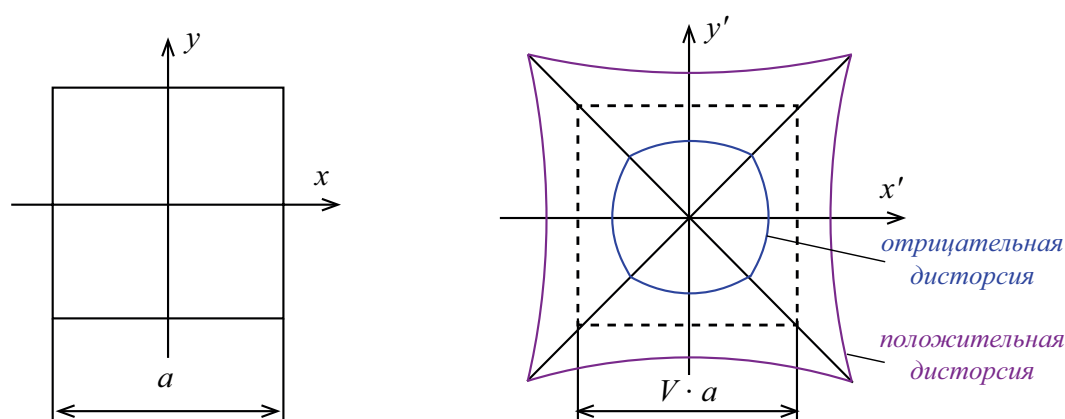


Рис. 4. Объект и его изображение при наличии дисторсии в оптической системе

Стоит отметить, что исправление дисторсии в оптической системе бортовой аппаратуры наблюдения является очень важным этапом работ по повышению качества получаемых в процессе аэрокосмической съемки снимков для последующей их фотограмметрической обработки.

Заключение

Таким образом, проведенные отечественные и зарубежные исследования по определению координат точек (объектов) местности на аэрокосмических изображениях (снимках) показывают, что для повышения точности их определения необходимо учитывать поправки (приращения) в соответствующие координаты точек, вызванные кривизной подстилающей поверхности, атмосферной рефракцией, дисторсией объектива бортовой аппаратуры наблюдения. В настоящей статье автором приведены основные аналитические выражения по определению поправок (приращений координат) в плоские координаты точек местности, изображенных на аэрокосмических снимках.

Список источников

1. Владимиров В. М. Дистанционное зондирование Земли. М.: ИНФРА-М, 2017. 572 с.
2. Козин Е. В., Карманов А. Г., Карманова Н. А. Фотограмметрия. СПб.: СПб НИУ ИТМО, 2019. 142 с.
3. Тюфлин Ю. С. Космическая фотограмметрия при изучении планет и спутников. М.: Недра, 1986. 247 с.
4. Козин Е. В. Об определении направляющих косинусов вектора луча визирования в системах координат различных камер (сенсоров) // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69, № 5. С. 46–53.
5. Козин Е. В. Анализ оценивания точности определения координат подспутниковых точек // Наука, бизнес, производство — проблемы и перспективы (Национальный открытый институт, 21–22 апреля 2025 года). СПб., 2025. С. 98–101.
6. Гарбук С. В., Гершензон В. Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли. М., 2003. 344 с.
7. Есмагамбет И. Данные дистанционного зондирования Земли. М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2013. 116 с.
8. Шамаева О. Г., Старостина О. В. Факторы, влияющие на дешифровочные свойства космических снимков // Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal). 2019. №. 10 (50). С. 33–36.
9. High Resolution Optical Satellite Imagery / I. Dowman [et al.]. Whittles Publishing, 2012. 230 p.
10. Жимбуева Л. Д. Метод определения суммарной дисторсии цифровых изображений // Компьютерная оптика. 2011. Т. 35, № 3. С. 347–355.

Дата поступления: 25.06.2026

Решение о публикации: 20.08.2026

Контактная информация:

КОЗИН Евгений Вячеславович — кандидат техн. наук, доцент; ekozin1970@mail.ru

About the Factors Affecting the Accuracy of Image Formation

E. V. Kozin

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

For citation: Kozin E. V. About the Factors Affecting the Accuracy of Image Formation // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 3, pp. 155–164. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-155-164 (In Russian)

Abstract

Objective: in this article, the author explores how the main physical factors that arise during the process of aerospace surveying of a terrain area affect the accuracy of determining the coordinates of terrain points (objects). To address the issue of eliminating the influence of these factors, an analytical photogrammetric approach is typically used to determine corrections (increments) to the corresponding coordinates of terrain points in the images. **Methods:** as the main methods for accounting for and eliminating the main factors affecting the accuracy of image formation, it is proposed to use analytical photogrammetric methods for processing images obtained during aerospace surveying, including methods of projective geometry. **Results:** the influence of the main factors affecting image generation accuracy is eliminated by introducing appropriate corrections to the corresponding coordinates of ground points measured in images using high-precision photogrammetric systems and software packages. Corrections (coordinate increments), determined using analytical expressions for calculating the increments of the coordinates of ground points recognized in the images, are introduced into the measured coordinates of the ground points. **Practical significance:** current photogrammetric image processing practices, along with ongoing scientific research and experiments, demonstrate that to improve the accuracy of coordinate determination in an aerospace image (photograph), it is necessary to consider corrections (increments) to the corresponding point coordinates caused by the influence of the main physical factors, including: the curvature of the Earth's underlying surface, atmospheric refraction, and lens distortion of the observation equipment used.

Keywords: point, surface, point offset, coordinate, image, photograph

References

1. Vladimirov V. M. Distancionnoe zondirovanie Zemli [Earth Remote Sensing], Moscow, INFRA-M, 2017, 572 p. (In Russian)
2. Kozin E. V., Karmanov A. G., Karmanova N. A. Fotogrammetriya [Photogrammetry], St. Petersburg, SPb.: SPb NIU ITMO [Saint Petersburg, National Research University of Information Technologies], 2019, 142 p. (In Russian)
3. Tyuflin Yu. S. Kosmicheskaya fotogrammetriya pri izuchenii planet i sputnikov [Space Photogrammetry in the Study of Planets and Satellites], Moscow, Nedra [The Bowels], 1986, 247 p. (In Russian)

4. Kozin E. V. Ob opredelenii napravlyayushchikh kosinusov vektora luchy vizirovaniya v sistemakh koordinat razlichnykh kamer (sensorov) [On Determining the Direction Cosines of the Sighting Ray Vector in Coordinate Systems of Different Cameras (Sensors)], *Izvestiya vuzov "Geodeziya i aerofotos"yemka* [Proceedings of Universities "Geodesy and Aerophotography"], 2025, vol. 69, no. 5, pp. 46–53. (In Russian)
5. Kozin E. V. Analiz otsenivaniya tochnosti opredeleniya koordinat podsputnikovyykh toчек [Analysis of Estimating the Accuracy of Determining the Coordinates of Sub-Satellite Points], *Nauka, biznes, proizvodstvo — problemy i perspektivy, Nacional'nyj otkrytyj institut, 21–22 aprelya 2025 goda* [Science, Business, Production — Problems and Prospects, National Open Institute, April 21–22, 2025], St. Petersburg, 2025, pp. 98–101. (In Russian)
6. Garbuk S. V., Gershenson V. E. Kosmicheskie sistemy distancionnogo zondirovaniya Zemli [Space Systems for Earth Remote Sensing], Moscow, 2003, 344 p. (In Russian)
7. Esmagambet I. Dannye distancionnogo zondirovaniya Zemli [Earth Remote Sensing Data], Moscow, LAP Lambert Academic Publishing, 2013, 116 p.
8. Shamaeva O. G., Starostina O. V. Faktory, vliyayushchie na deshifrovochnye svoystva kosmicheskikh snimkov [Factors Affecting the Interpretation Properties of Space Images], *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe* [East European Scientific Journal], 2019, no. 10 (50), pp. 33–36. (In Russian)
9. Dowman I., et al. High-Resolution Optical Satellite Images, Whittles Publishing, 2012, 230 p.
10. Zhimbueva L. D. Metod opredeleniya summarnoy distorsii tsifrovyykh izobrazheniy [Method for Determining the Total Distortion of Digital Images], *Komp'yuternaya optika* [Computer Optics], 2011, vol. 35, no. 3, pp. 347–355. (In Russian)

Received: June 25, 2026

Accepted: August 20, 2026

Author's information:

Evgeny V. KOZIN — PhD in Engineering, Associate Professor; ekozin1970@mail.ru

УДК 004.056:004.421.6

Повышение конфиденциальности в образовательных данных: разработка алгоритма обезличивания с использованием AES/GCM и методов перемешивания

Е. В. Зверева¹, Р. А. Ещенко², Е. С. Добросельская², О. И. Чуйко³, Я. Д. Новак³

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

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

³ Хабаровский институт инфокоммуникаций — филиал Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики, Россия, 680013, Хабаровск, ул. Ленина, 73

Для цитирования: Зверева Е. В., Ещенко Р. А., Добросельская Е. С., Чуйко О. И., Новак Я. Д. Повышение конфиденциальности в образовательных данных: разработка алгоритма обезличивания с использованием AES/GCM и методов перемешивания // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 3. С. 165–187. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-165-187

Аннотация

Цель: проанализировать существующие методы и способы обезличивания персональных данных студентов, а также разработать алгоритмы их обезличивания для обеспечения информационной безопасности в образовательных организациях с учетом требований российского законодательства.

Методы: сравнение существующих подходов для обезличивания персональных данных. Предложен гибридный алгоритм обезличивания персональных данных, который сочетает в себе метод изменения состава или семантики и метод перемешивания, основанный на современных криптографических стандартах. Разработан комплексный алгоритм обезличивания персональных данных. **Результаты:** предоставление организациям образовательной сферы возможности осуществлять легальную передачу сведений в целях статистического анализа, валидации методик, тестирования программных средств или проведения прикладных исследований без нарушения прав субъектов данных, одновременно снижая риски несанкционированного доступа. **Практическая значимость:** создан и экспериментально обоснован комплексный алгоритм для деидентификации персональных данных, предназначенных для применения в инфраструктуре образовательных учреждений. Данный алгоритм, базирующийся на комбинации трансформации семантической структуры, перемешивания записей и использования актуальных криптографических протоколов и стандартов, обеспечивает возможность легитимной обработки персональных данных обучающихся с соблюдением нормативных требований, которые закреплены в отечественном законодательстве об информации, информационной безопасности и персональных данных.

Ключевые слова: обезличивание персональных данных, анонимизация, информационная безопасность, криптография, AES/GCM, PBKDF2, HMAC, SHA-256, Base64, метод перемешивания, метод изменения состава или семантики

Введение

В современном цифровом обществе вопросы обеспечения информационной безопасности приобретают особую актуальность не только в крупных коммерческих организациях или государственных структурах, но и в образовательных учреждениях. Активное внедрение информационных систем в образовательный

процесс, постоянный обмен разными данными о студентах, преподавателях и иных участниках образовательных отношений приводят к необходимости надежной защиты персональных данных (ПД). Университеты располагают массивами различной чувствительной информации: паспортными и налоговыми данными студентов, сведениями о месте жительства, номерами телефонов, результатами обучения и другими персональными сведениями. В этих условиях одним из основных требований становится соответствие используемых методик обработки законодательству РФ.

Федеральный закон от 27 июня 2006 года № 152-ФЗ «О персональных данных» устанавливает права физических лиц, являющихся субъектами персональных данных, ответственность за нарушение процедур обработки, выделяет отдельные принципы хранения, актуализации и уничтожения ПД, а также требует регулярно внедрения организационных и технических мер, гарантирующих анонимность и невозможность несанкционированного раскрытия информации о субъектах.

Для университетской среды задачи защиты ПД студентов осложняются дополнительными условиями — высокой динамикой контингента обучающихся, разнообразием используемых информационных ресурсов, необходимостью соблюдения как требований информационной безопасности, так и доступности данных для учебных, исследовательских и административных целей. Решение вопросов анонимизации данных не может быть сведено к простой задаче удаления идентификаторов или маскировки отдельных полей. В практических условиях университеты сталкиваются с ситуациями, когда обезличенные данные должны быть пригодны для статистических исследований, внутреннего аудита, формирования отчетности, но при этом не должны приводить к возможности идентификации реального лица без специально регулируемого доступа.

Современные подходы к обезличиванию данных предлагают широкий инструментарий методов. Среди них можно выделить введение идентификаторов, изменение состава или семантики, декомпозицию, а также перемешивание. Каждый из методов обладает собственными преимуществами и ограничениями, а их комбинация позволяет выстроить индивидуальный контур безопасности с учетом специфики обрабатываемых данных и задач образовательного учреждения. Особое значение имеет качество алгоритмической реализации: решения обязаны быть не только устойчивыми к атакам на приватность, но и не снижать полезность данных для легитимных целей поиска, статистики и администрирования.

В рамках научного исследования поставлена задача разработки комплексного алгоритма обезличивания персональных данных студентов университета для обеспечения информационной безопасности. Цели настоящей работы: анализ предметной области, классификация и сравнение существующих методов обезличивания, проектирование и программная реализация алгоритма обезличивания.

Обзор нормативно-правовой базы

Основным нормативно-правовым актом является федеральный закон от 27 июня 2006 года № 152-ФЗ «О персональных данных», который регулирует отношения, связанные с обработкой персональных данных с использованием средств автоматизации [1]. Положения закона закрепляют:

- принципы и условия обработки персональных данных;
- права субъекта персональных данных;
- обязанности оператора;
- контроль за обработкой персональных данных;
- ответственность за нарушение данного закона.

Контроль и надзор за соответствием обработки персональных данных требованиям законодательства Российской Федерации в области персональных данных осуществляется Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) [1, 5].

Состав и содержание требований к защите персональных данных при их обработке в информационных системах устанавливаются Федеральной службой безопасности (ФСБ) и Федеральной службой технического экспорта и контроля (ФСТЭК) [1, 3, 4].

Помимо федерального закона № 152-ФЗ, обезличивание персональных данных закрепляется постановлением Правительства Российской Федерации от 21 марта 2012 года № 211 «Об утверждении перечня мер, направленных на обеспечение выполнения обязанностей, предусмотренных Федеральным законом «О персональных данных» и принятыми в соответствии с ним нормативными правовыми актами, операторами, являющимися государственными или муниципальными органами» [6].

В приказе Роскомнадзора от 5 сентября 2013 года № 996 «Об утверждении требований и методов по обезличиванию персональных данных» закреплены требования и методы по обезличиванию персональных данных, обрабатываемых в информационных системах [9]. Перечень методов, закрепленных данным документом:

- введение идентификаторов;
- изменение состава или семантики;
- декомпозиция;
- перемешивание.

Анализ существующих методов обезличивания

Анализ существующих методов обезличивания проводится в соответствии со свойствами обезличенных данных и методов обезличивания [10].

Метод введения идентификаторов

1. Полнота: в таблицу соответствия заносится вся информация, позволяющая идентифицировать субъекта персональных данных.

2. Структурированность: каждому идентификатору однозначно соответствует свой набор данных.

3. Релевантность: отсутствует, так как вид представления персональных данных в запросе и ответе на запрос может отличаться.

4. Семантическая целостность: персональные данные переносятся в таблицу соответствия, при этом их вид представления остается неизменным.

5. Применимость: возможна обработка каждой записи и обезличенных данных в целом без деобезличивания.

6. Анонимность: возможно обеспечить только при определенных правилах выбора идентификаторов и заменяемых ими персональных данных.

Метод изменения состава или семантики

1. Полнота: только если гарантирована сохранность данных при проведении изменений.

2. Структурированность: между значениями атрибутов персональных данных субъекта существует связь, которая остается неизменной.

3. Релевантность: в определенных случаях возможно получить семантическое соответствие поискового запроса и полученного ответа на запрос.

4. Семантическая целостность: только если сохраняется семантика данных при проведении изменений в составе персональных данных.

5. Применимость: позволяет осуществлять обработку, не требующую деобезличивания всего объема данных о субъектах.

6. Анонимность: удаление или обобщение части данных приводит к неоднозначности при идентификации с использованием обезличенных данных.

Метод декомпозиции

1. Полнота: информация о субъектах персональных данных не удаляется, а переносится в другое хранилище.

2. Структурированность: существующая связь между записями в разных хранилищах позволяет однозначно сопоставлять их.

3. Релевантность: возможно получить семантическое соответствие поискового запроса и полученного ответа на запрос.

4. Семантическая целостность: семантика и вид представления данных о субъекте не изменяются.

5. Применимость: позволяет осуществлять обработку данных, расположенных в одном хранилище, как независимо от другого, так и при совместном их использовании, без деобезличивания всего объема обезличенных данных.

6. Анонимность: только при достаточно сложных связях между хранилищами и защите хранилищ от несанкционированного доступа.

Метод перемешивания

1. Полнота: сохраняется вся информация о субъектах персональных данных.

2. Структурированность: при деобезличивании персональных данных связи между ними полностью восстанавливаются.

3. Релевантность: возможно получить семантическое соответствие поискового запроса и полученного ответа на запрос.

4. Семантическая целостность: вид представления данных о субъекте и семантика данных остаются неизменными.

5. Применимость: при наличии доступа к дополнительной информации может осуществляться обработка как отдельных записей о субъектах, так и всех данных без деобезличивания всего объема обезличенных данных.

6. Анонимность: данные перемешиваются по каждому отдельному атрибуту записи о субъекте, что не позволяет без доступа к дополнительной информации определить принадлежность тех или иных данных конкретному субъекту.

По результатам проведенного анализа составлена таблица соответствия методов обезличивания свойствам обезличенных данных и методов обезличивания, где знаком «+» показано безусловное наличие свойства, знаком «*» — наличие свойства при выполнении условия, а знаком «–» — отсутствие свойства.

ТАБЛИЦА. Соответствие методов обезличивания свойствам обезличенных данных

Метод обезличивания Свойства обезличенных данных	Метод введения идентификаторов	Метод изменения состава или семантики	Метод декомпозиции	Метод перемешивания
Полнота	+	*	+	+
Структурированность	+	+	+	+
Релевантность	–	+	+	+
Семантическая целостность	+	*	+	+
Применимость	+	+	+	+
Анонимность	*	+	*	+

Проведенный анализ показал, что все методы в той или иной мере соответствуют свойствам обезличенных данных и методам обезличивания.

Метод перемешивания соответствует всем свойствам безусловно. У остальных одно или два свойства обеспечиваются только при выполнении определенных условий.

В методических рекомендациях Роскомнадзора по применению приказа № 996 прописано, что для улучшения защищенности данных рекомендуется совместно применять несколько методов [10].

Описание предложенного гибридного алгоритма обезличивания

Разрабатываемый алгоритм для обезличивания данных использует следующие средства для защиты информации:

- Переменная окружения — набор значений, которые определяют поведение и настройки операционной системы, а также других программ, работающих в этой среде. Они используются для хранения информации, необходимой различным приложениям, и для настройки системных параметров [18].

- AES (Advanced Encryption Standard) — симметричный алгоритм блочного шифрования, в котором используется один и тот же криптографический ключ для шифрования и для расшифровки данных. Он работает с блоками размера 128 бит и поддерживает ключи размером 128, 192, 256 бит [16].

- GCM (Galois Counter Mode) — режим работы симметричных блочных шифров, принцип работы которого включает использование счетчика для шифрования, применение функции Галуа для создания тега аутентификации, комбинацию блоков шифротекста и кода аутентификации, а также использование ключа хеширования [17].

- PBKDF2 (Password-Based Key Derivation Function 2) — стандарт формирования ключа на основе пароля. Компонентами алгоритма являются псевдослучайная функция, мастер-пароль, соль, количество итераций, желаемая длина ключа [14].

- HMAC (Hash-based Message Authentication Code) — криптографическая конструкция, которая использует хеш-функцию для создания кода аутентификации сообщения [20].

- SHA-256 (Secure Hash Algorithm 256-bit) — криптографический алгоритм однонаправленных хеш-функций с размером выхода 256 бит, основанный на технологии Меркла — Дамгарда с протоколом сжатия Дэвиса — Мейера [19].

- Соль (salt) — строка входных данных, которая добавляется к исходному массиву данных при вычислении хеша. Она используется для усложнения процесса восстановления исходных данных методом перебора [21].

- Nonce (number only used once) — уникальное числовое значение, которое используется только один раз в процессе шифрования или криптографических операций [21].

- Шифротекст — зашифрованные и нечитаемые данные, которые можно прочитать только после их расшифровки с помощью специального ключа шифрования [17].

- Тег (tag) — специальная последовательность бит, которая добавляется к зашифрованному сообщению для проверки его целостности [16].

- Base64 — стандарт кодирования бинарных данных в текстовый формат, использующий 64 различных символа ASCII, в котором исходные бинарные данные разбиваются на блоки по 6 бит, каждый блок кодируется соответствующим символом из алфавита [20].

Перед началом шифрования ищется существующая переменная окружения с секретом. Переменная должна иметь префикс, указывающий на область применения. В нашем случае используется «DB_», потому что алгоритм меняет данные в базе. Допустимы только символы Base64, и переменная должна быть длиной не менее 256 бит. В случае отсутствия данной переменной берется значение секрета по умолчанию.

Далее создается криптографический ключ для AES, в котором формируется строка-вход на основании секрета, соли и строки с текущей датой и временем. После строка-вход переводится в байты.

Затем с помощью PBKDF2 с HMAC генерируется ключ, использующий для генерации SHA-256, соль, 100 тысяч итераций и длину ключа в 32 байта.

Следующим шагом является превращение символов в целое число, которое затем преобразуется в байтовое число. В коде это преобразование выполняется так:

- строка, состоящая из цифр, парсится в целочисленный тип (int или long) с помощью `int.Parse()` или `long.Parse()`;
- полученное число затем преобразуется в массив байтов фиксированной длины с порядком байт bigendian (старший байт записывается первым). Это делается либо через `BitConverter.GetBytes()` с последующим реверсом (если система littleendian), либо вручную через поразрядные сдвиги.

Для деобезличивания производится обратное преобразование. Далее генерируется nonce для AES. После создается AES-GCM-шифратор, основными компонентами которого являются [13]:

- K — секретный ключ (128, 192 или 256 бит);
- IV — вектор инициализации (обычно 96 бит);
- P — открытый текст для шифрования;
- AAD — дополнительные аутентифицируемые данные;
- C — шифротекст;
- T — тег аутентификации (обычно 128 бит).

Процесс работы AES-GCM-шифратора состоит из следующих шагов [13].

Шаг 1. Генерация подключа для операций в поле Галуа — H :

$$H = E_K(0^{128}), \quad (1)$$

где E_K — функция шифрования AES с ключом K ;
 0^{128} — блок из 128 нулевых бит.

Шаг 2. Формирование счетчика с начальным значением J_0 .

При длине IV равной 96 бит:

$$J_0 = IV \parallel 0^{31} \parallel 1, \quad (2)$$

где 0^{31} — 31 нулевой бит;
1 — один бит со значением 1.

При длине IV , не равной 96 бит:

$$J_0 = GHASH_H \left(IV \parallel 0^s \parallel \left[\text{len}(IV) \right]_{64} \right), \quad (3)$$

где $GHASH_H$ — хеш-функция в поле Галуа с ключом H ;

s — количество нулевых бит для дополнения, чтобы длина была кратна 128;

$\left[\text{len}(IV) \right]_{64}$ — длина IV , представленная 64-битным числом.

Шаг 3. Формирование последовательности счетчиков — J_i :

$$J_i = \text{inc}_{32} (J_{i-1}) \text{ для } i = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

где inc_{32} — операция инкремента младших 32 бит счетчика;

i — порядковый номер в последовательности счетчиков;

n — количество блоков открытого текста.

Шаг 4. Шифрование блоков открытого текста.

Для всех блоков открытого текста, кроме последнего:

$$C_i = P_i \oplus E_K (J_i) \text{ для } i = 1, 2, \dots, n-1, \quad (5)$$

где C_i — результирующий i -й блок шифротекста;

P_i — i -й блок открытого текста.

Для последнего блока, который может быть неполным:

$$C_n = P_n \oplus MSB_{|P_n|} (E_K (J_n)), \quad (6)$$

где C_n — последний блок шифротекста;

P_n — последний блок открытого текста;

MSB — функция, которая берет только заданное количество старших бит;

$|P_n|$ — размер последнего блока открытого текста в битах.

Шаг 5. Подготовка данных для функции GHASH.

Дополненные до размера, кратного 128 битам, дополнительные аутентифицируемые данные — A' :

$$A' = AAD \parallel 0^s. \quad (7)$$

Дополненный до размера, кратного 128 битам, шифротекст — C' :

$$C' = C \parallel 0^t, \quad (8)$$

где t — количество нулевых бит, которые нужно добавить к шифротексту.

Шаг 6. Вычисление промежуточного значения аутентификации — S :

$$S = GHASH_H (A' \parallel C' \parallel \left[\text{len}(AAD) \right]_{64} \parallel \left[\text{len}(C) \right]_{64}), \quad (9)$$

где $\left[\text{len}(AAD) \right]_{64}$ — длина дополнительных аутентифицируемых данных, представленная 64-битным числом;

$\left[\text{len}(C) \right]_{64}$ — длина шифротекста, представленная 64-битным числом.

Шаг 7. Вычисление итогового аутентификационного тега — T :

$$T = MSB_t(S \oplus E_K(J_0)), \quad (10)$$

где t — длина тега аутентификации в битах.

Шаг 8. Вычисление функции $GHASH$:

$$GHASH_H(X_1, X_2, \dots, X_m) = X_1 \cdot H^m \oplus X_2 \cdot H^{m-1} \oplus \dots \oplus X_m \cdot H^1, \quad (11)$$

где X_i — i -й 128-битный блок входных данных;

H_i — H , возведенное в степень i в поле Галуа.

Все операции в $GHASH$ выполняются в конечном поле Галуа — $GF(2^{128})$, определенном с помощью неприводимого полинома — $p(x)$:

$$p(x) = x^{128} + x^7 + x^2 + x + 1. \quad (12)$$

Шифратор шифрует получившееся ранее байтовое число, получая шифротекст и аутентификационный тег. Далее происходит соединение попсо, шифротекста и тега, который кодируется в выходную строку вида base64.

Блок-схема разработанного алгоритма обезличивания персональных данных представлена на рис. 1.

Перечисленные выше шаги и средства используются для обезличивания всех видов данных, представленных в статье.

В процессе работы с данными предусмотрены следующие блоки для обработки возможных ошибок:

1. Проверка на null или пустые строки (`string.IsNullOrEmpty`).
2. Проверка длины и допустимых символов (например, для СНИЛС — `snilsFull.Length >= 9`, для ИНН — `inn.Length == 12 && inn.All(char.IsDigit)`).
3. Проверка формата даты через `DateTime.ParseExact` (при генерации маскированных дат).
4. Проверка соответствия шаблону номера телефона с помощью регулярных выражений.
5. При невыполнении условий функция возвращает пустые строки.
6. В методе обезличивания вызовы обернуты в блоки `try-catch`. В случае исключения записывается пустая строка
7. При деобезличивании вызовы также обернуты в блоки `try-catch` — при ошибке просто пропускается восстановление поля.
8. Для дат используется `DateTime.ParseExact` с `CultureInfo.InvariantCulture`, что гарантирует строгий формат.

В процессе работы алгоритма компоненты для обезличивания хранятся в бинарном виде. При работе с базой данных используется формат JSON.

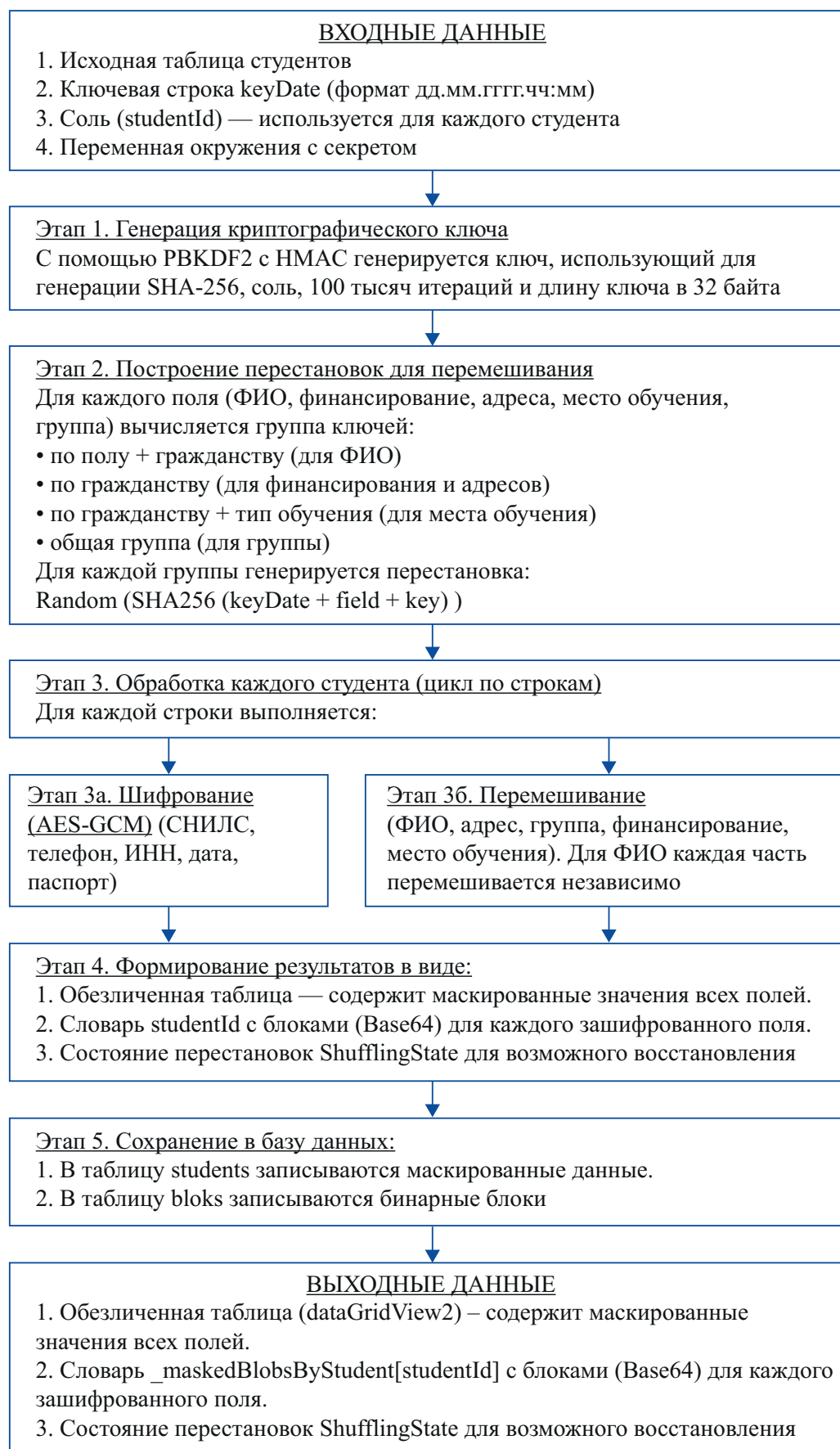


Рис. 1. Блок-схема гибридного алгоритма обезличивания персональных данных

Ниже в пунктах 1–5 представлено конкретизированное использование средств для обезличивания данных по методу изменения состава или семантики, в пункте 6 — по методу перемешивания.

1. Обезличивание СНИЛС

СНИЛС (страховой номер индивидуального лицевого счета) — это уникальный номер человека в системе обязательного пенсионного страхования России. Данный номер присваивается один раз в жизни и не меняется при смене личных данных. СНИЛС состоит из 11 цифр в формате XXX-XXX-XXX-YY, где последние две цифры — контрольное число [2].

Контрольное число СНИЛС рассчитывается следующим образом [11]:

- каждая цифра СНИЛС умножается на номер своей позиции, которые отсчитываются с конца);
- полученные произведения суммируются;
- сумма делится на 101;
- последние две цифры остатка от деления являются контрольным числом.

Для обезличивания СНИЛС берется созданный криптографический ключ, далее генерируется nonce для AES. После первые девять цифр СНИЛС переводятся в число в виде 4 байт со способом хранения big-endian — способ хранения многобайтовых чисел, при котором старший, наиболее значимый байт располагается по наименьшему адресу памяти. AES-GCM-шифратором шифруются байты с получением шифротекста и аутентификационного тега, которые вместе с nonce кодируются в выходную строку вида base64 для хранения и последующей расшифровки. Шифротекст также используется еще раз для превращения его в число с ограничением диапазона до девятизначного. По маскированному СНИЛС производится расчет контрольной суммы для проверки валидности номера, который в конце добавляется для получения полного номера СНИЛС, замещающего исходный.

Для деобезличивания производится декодирование base64 в байты. Байты делятся по следующему принципу: nonce — первые 12 байт, далее 4 байта — шифротекст, тег — оставшиеся. Далее создается AES-GCM-дешифратор с тем же ключом nonce, который с проверкой тега расшифровывает шифротекст. После преобразования получается исходный СНИЛС — первые девять цифр. С помощью вычисления контрольного числа из исходных цифр добавляются последние две цифры. В итоге возвращается полный СНИЛС — строка из 11 цифр.

2. Обезличивание номеров телефонов

Для процесса обезличивания номеров телефонов вначале необходимо создать словарь для разных шаблонов номеров, так как в университете обучаются не только студенты из Российской Федерации. В каждом случае сохраняются коды стран и оператора, но маскируются позиции номера абонента. Например, для номеров телефонов России и Китая будут маскироваться цифры с 5 по 11, так как маска номеров — +7- или 8-YYY-XXX-XX-XX и +86-YY-XXX-XX-XX соответственно,

где первые цифры — код страны, Y — цифры кода оператора, X — цифры абонентского номера. Но для телефонов Монголии будут маскироваться цифры с шестой по одиннадцатую, так как маска номеров — +976-YY-XXX-XXX.

Перед началом обезличивания номер телефона делится на составляющие — префикс и основную часть. Префикс — код страны и оператора, основная часть — номер абонента. Далее эти части проверяются на соответствие словарю.

Для обезличивания номера берется созданный криптографический ключ, далее генерируется nonce для AES. После часть телефона с номером абонента переводится в 8-байтовый массив, который дополняется ведущими нулями при необходимости. Далее байты превращаются в одно число, которое преобразуется в строку, обрезанную под нужную длину символов. Это необходимо для создания маски, состоящей из цифр. AES-GCM-шифратором шифруются байты с получением шифротекста и аутентификационного тега, которые вместе с nonce кодируются в выходную строку вида base64 для хранения и последующей расшифровки. После маскированные байты соединяются с кодом оператора для создания виртуального номера с подменой номера абонента.

С целью восстановления оригинального номера извлекается префикс, чтобы знать, сколько цифр было зашифровано. Далее восстанавливается количество цифр, находящихся в основной части номера. Затем производится декодирование base64 в байты. Байты делятся по следующему принципу: nonce — первые 12 байт, далее 8 байтов — шифротекст, тег — оставшиеся. После этого создается AES-GCM-дешифратор с тем же ключом nonce, который с проверкой тега расшифровывает шифротекст. Полученное значение преобразуется в абонентский номер, который затем соединяется с префиксом, чтобы получить исходный номер телефона.

3. Обезличивание номера ИНН

ИНН (идентификационный номер налогоплательщика) — это уникальный номер, который используется налоговыми органами для учета уплаченных и подлежащих уплате налогов и сборов каждого экономического агента [8].

ИНН физического лица состоит из 12 цифр в формате ZZZZXXXXXXYY, где Z — цифры кода подразделения Федеральной налоговой службы России (ФНС России): первые две — код региона согласно Конституции РФ, последние две — код подразделения ФНС России внутри данного региона; X — цифры номера налогоплательщика, уникального в рамках данного подразделения ФНС; Y — цифры проверочного кода согласно коду проверки [8].

Для ИНН из 12 знаков алгоритм проверки выглядит следующим образом [15]:

- вычисляется контрольная сумма по первым одиннадцати знакам со следующими весовыми коэффициентами: 7, 2, 4, 10, 3, 5, 9, 4, 6, 8, 0;
- вычисляется контрольное число $_1$ как остаток от деления контрольной суммы на 11;

- если контрольное число_1 больше девяти, то контрольное число_1 вычисляется как остаток от деления контрольного числа_1 на 10;
- вычисляется контрольная сумма по двенадцати знакам со следующими весовыми коэффициентами: 3, 7, 2, 4, 10, 3, 5, 9, 4, 6, 8, 0;
- вычисляется контрольное число_2 как остаток от деления контрольной суммы на 11;
- если контрольное число_2 больше девяти, то контрольное число_2 вычисляется как остаток от деления контрольного числа_2 на 10;
- контрольное число_1 проверяется с одиннадцатым знаком ИНН и контрольное число_2 проверяется с двенадцатым знаком ИНН. Если полученные результаты равны, то ИНН считается верным.

Данные ИНН обезличиваются в следующем порядке. Сначала проверяется количество цифр, оно должно соответствовать 12. Далее берется созданный криптографический ключ, и генерируется nonce для AES. Затем целое число, состоящее из шести цифр с номером налогоплательщика, переводится в строку из шести цифр, что необходимо для обеспечения количества цифр при подмене реального номера. AES-GCM-шифратором шифруются байты с получением шифротекста и аутентификационного тега, которые вместе с nonce кодируются в выходную строку вида base64 для хранения и последующей расшифровки. Далее собирается новый номер ИНН, в котором первые четыре цифры — оригинальные, следующие шесть — зашифрованные, затем вычисляются и подставляются последние две цифры проверочного кода.

Для деобезличивания ИНН сначала проводится проверка, что ИНН — строка из 12 цифр. Затем происходит декодирование base64 в байты. Байты делятся по следующему принципу: nonce — первые 12 байт, далее 3 байта — шифротекст, тег — оставшиеся. Далее создается AES-GCM-дешифратор с тем же ключом nonce, и он с проверкой тега расшифровывает шифротекст. Далее к исходным четырём первым цифрам подставляется получившийся в результате дешифрования оригинальный сегмент. Затем пересчитываются контрольные цифры, которые подставляются в конец.

4. Обезличивание даты

Даты рождения и выдачи паспорта взаимосвязаны друг с другом в случаях первичного получения паспорта в 14 лет, а также смены в связи с достижением 20 и 45 лет. Получение или смена паспорта в таких случаях обычно происходит в течение 90 календарных дней с момента наступления возраста [7]. Следовательно, для корректной замены даты выдачи паспорта необходимо, чтобы ее дата и месяц не превышали 90 дней от даты и месяца рождения.

Предварительно нужно создать проверку на соответствие возрасту на момент выдачи паспорта с максимальной разницей, не превышающей 90 дней. Это делается для проверки информации, что паспорт был выдан по достижении

определенного возраста или по иным причинам: утере, смене фамилии, получении гражданства. Данный этап позволит правильно произвести замену исходных значений даты на маскированное значение.

Для обезличивания даты сначала она разбирается на компоненты. Берется созданный криптографический ключ, далее генерируется nonce для AES. Дата и месяц преобразуются в два байта. AES-GCM-шифратором шифруются байты с получением шифротекста и аутентификационного тега. Далее байты шифротекста преобразуются в маскированные значения дня и месяца: день — первый байт, для которого делается операция взятия остатка от деления на 31 с прибавлением единицы, месяц — второй байт, для которого делается операция взятия остатка от деления на 12 с прибавлением единицы. Данный шаг необходим, чтобы маскированные дата и месяц были правильного формата. Дальше ведется проверка на соответствие возраста для выдачи паспорта. Если подтверждается, что паспорт получен по достижении возраста, то количество дней между исходными датами прибавляется к маскированной дате рождения, чтобы получить дату выдачи паспорта. Год при этом вычислении не учитывается. Если паспорт был выдан по иным причинам, то дополнительно просто шифруется дата выдачи. Шифротекст, а также аутентификационный тег вместе с nonce кодируются в выходную строку вида base64 для хранения и последующей расшифровки даты рождения. Для даты выдачи также добавляются параметры nonce и тега аутентификации.

Для деобезличивания маскированные строки дат разбираются на компоненты, берется ключ, используемый для маскирования, декодируются из base64 nonce и тег. Далее происходит восстановление даты рождения. Перебираются значения байтов для дня и месяца с проверкой на соответствие маскированным значениям. При соответствии расшифровываются байты с проверкой тега аутентификации. В случае успешной расшифровки формируются исходные даты и месяцы. Для варианта при получении паспорта, связанном с достижением возраста, вычисляется разница в датах рождения и выдачи паспорта, которая затем складывается с исходной датой рождения, чтобы получить исходное значение даты выдачи паспорта.

Дата документа о предыдущем образовании обезличиваться не будет, так как большое количество людей имеет идентичные даты, что соответствует концепции k-анонимности.

5. Обезличивание серии и номера паспорта

Нумерация паспорта гражданина РФ состоит из серии и номера в формате ZZYY XXXXXX. Серия состоит из 4 цифр. Первые две — номер региона по общероссийскому классификатору территорий муниципальных образований (ОКТМО), выдавшего документ. Вторые две — год, когда был изготовлен бланк паспорта, в нем допускается отклонение до 3 лет. Номер паспорта состоит из шести цифр, они означают номер бланка, на котором печатался паспорт [7].

Буквенно-цифровая нумерация паспорта иностранных граждан состоит из серии и номера в формате YYXXXXXXX. Первые два символа — серия паспорта. Она может быть представлена как в виде цифр, так и в виде букв. Оставшиеся семь цифр — номер бланка паспорта [12]. В российских системах внесение информации о таких паспортах производится только в поле номера паспорта, куда записывается буквенно-цифровая нумерация полностью.

Серия паспортов для обоих вариантов будет оставаться без изменения.

Перед началом обезличивания производится анализ на гражданство. Если используются шесть цифр, то считается, что это паспорт гражданина РФ, и все цифры переходят на обезличивание. В случае если используется девять символов, то считается, что это паспорт иностранного гражданина. В таком варианте первые два символа остаются без изменения, а оставшиеся семь подлежат маскировке.

Далее берется созданный криптографический ключ, затем генерируется nonce для AES. После строка, которая подлежит маскировке, преобразуется в число. Затем она кодируется в байты в формат со способом хранения big-endian для шестизначного — в 3 байта, для семизначного — в 4 байта. AES-GCM-шифратором шифруются байты с получением шифротекста и аутентификационного тега, которые вместе с nonce кодируются в выходную строку вида base64 для хранения и последующей расшифровки. Зашифрованные байты переводятся обратно в числовое выражение, где делается остаток по модулю 10, чтобы получить числа только нужной длины. В итоге получается маскированное значение паспорта.

Для процесса деобезличивания производится декодирование base64 в байты. Далее по количеству цифр в маскированном номере определяется длина шифротекста. Байты декодирования делятся по следующему принципу: nonce — первые 12 байт, далее 6 или 7 байт — шифротекст, тег — оставшиеся. Дальше создается AES-GCM-дешифратор с тем же ключом nonce, и он с проверкой тега расшифровывает шифротекст. Если в номере было шесть цифр, то просто возвращаются восстановленные цифры, а если семь — то к нему еще прибавляются символы серии.

6. Обезличивание по методу перемешивания

Обезличивание ФИО, места рождения, места прописки и проживания, оконченого учебного заведения, типа обучения, группы происходит по единому принципу, где в качестве входных данных для хэш-функции используется id записи. Также для значений атрибутов курса, квалификации, специальности, профиля берется их связь с группой, в которой обучается студент.

Качественное перемешивание фамилий, имен и отчеств должно сопровождаться привязкой к полу и гражданству. Привязка к полу исключает возможности получить вариант ФИО с несогласованными по роду окончаниями — Петрова Петр Петровна. Привязка к гражданству исключает получение таких сочетаний

фамилии и имени, которые практически невозможны в моноэтнических странах. Например, фамилия и имя Чжан Анастасия вполне возможны в странах на территории СНГ в связи с многообразием этнических групп, но для гражданина Китая — очень редкое сочетание.

Для мест прописки и проживания также берется привязка к гражданству, чтобы не получилось записей, в которых гражданин РФ был бы прописан, например, в Китае.

Оконченное учебное заведение будет привязано к данным о квалификации студента, чтобы обеспечить внесению студентам магистратуры информации об окончании университета, а не школы или техникума.

Перемешивание типа обучения будет производиться только у студентов, чье гражданство включено в список стран СНГ, так как только они могут обучаться на всех трех основах поступления: бюджетная, целевая, договорная.

Корректное перемешивание групп, а вместе с этим и курса, квалификации, специальности, профиля, зависит от года окончания учебного заведения. Группы магистратуры также будут перемешиваться только между студентами, у которых атрибут «квалификация» равен «магистратура». Крайние годы окончания предыдущего образования для каждого курса: 2024 год — 1-й курс, 2023 год — 2-й курс, 2022 год — 3-й курс, 2023 год — 4-й курс, 2025 год — 5-й курс.

У всех описанных данных для обезличивания берется созданный криптографический ключ, далее генерируется nonce для AES. После id переводится в число в виде 4 байт со способом хранения big-endian. AES-GCM-шифратором шифруются байты с получением шифротекста и аутентификационного тега, которые вместе с nonce кодируются в выходную строку вида base64 для хранения и последующей расшифровки. Полученное значение шифротекста используется как ключ для сортировки. При перемешивании происходит перебор по выбранным для привязки в каждом случае значениям. Значения атрибутов затем упорядочиваются в соответствии с ключами сортировки. Конкретно для фамилии, имени, отчества вычисляются разные ключи, в результате чего для каждого атрибута перемешивание происходит независимо.

Для возвращения изначальных данных необходимо сохранение порядка, в котором атрибуты оказались, и на каком месте в перемешанных оказался исходный элемент. Программный интерфейс был выполнен с помощью инструментов Windows Forms.

На рис. 2 представлены две таблицы с исходными и обезличенными данными.

Заключение

Обеспечение информационной безопасности и конфиденциальности персональных данных — задача комплексная, затрагивающая все сферы деятельности современного образовательного учреждения.

The screenshot shows the 'DataAnonym' application window. At the top, there are three tabs: 'Обезличивание' (Anonymization), 'Деобезличивание' (De-anonymization), and 'Логи' (Logs). The 'Обезличивание' tab is active.

Below the tabs is a table with 9 columns: ID студента, Фамилия, Имя, Отчество, Пол, Группа, Курс, and Уровень образования. The table contains 6 rows of student data. The first row is highlighted in blue.

Below the table, there is a text input field for a date and time in the format 'D01.01.2000T00:00', a button labeled 'Обезличить' (Anonymize), and a 'Сохранить' (Save) button at the bottom right.

The table data is as follows:

ID студента	Фамилия	Имя	Отчество	Пол	Группа	Курс	Уровень образования
1	Ли	Шуан		женский	МО211ИТС	1	Магистратура
2	Кузина	Есения	Демидовна	женский	БО221ИСТ	2	Бакалавриат
3	Воробьева	Елизавета	Романовна	женский	БО221ПИН	2	Бакалавриат
4	Спиридонова	Злата	Егоровна	женский	БО241ПИН	4	Бакалавриат
5	Попова	Мария	Ивановна	женский	СО211КОБ	1	Специалитет
6	Игнатов	Иван	Александрович	мужской	СО211ОПМ	1	Специалитет

Below the table, there is a text input field for a date and time in the format 'D01.01.2000T00:00', a button labeled 'Обезличить' (Anonymize), and a 'Сохранить' (Save) button at the bottom right.

The table data is as follows:

ID студента	Фамилия	Имя	Отчество	Пол	Группа	Курс	Уровень образования
1	Хань	Вен		женский	МО211ИТС	1	Магистратура
2	Кузина	Мария	Ивановна	женский	БО231ИСТ	3	Бакалавриат
3	Попова	Есения	Романовна	женский	БО221ПИН	2	Бакалавриат
4	Воробьева	Елизавета	Егоровна	женский	БО211ИСТ	1	Бакалавриат
5	Спиридонова	Злата	Демидовна	женский	СО211КОБ	1	Специалитет
6	Игнатов	Марк	Глебович	мужской	БО241ИСТ	4	Бакалавриат

Рис. 2. Работа с обезличиванием

Являясь объектами регуляторного контроля и носителями значительных объемов чувствительной информации, университеты нуждаются в современных технологиях и методиках анонимизации, обеспечивающих не только защиту данных, но и их сохранение для образовательных, исследовательских и административных нужд.

В ходе выполнения исследования были проанализированы отечественные нормативно-правовые акты в области обработки персональных данных, описаны их свойства, принципы и порядок работы с ними.

Обезличенные данные должны обладать следующими свойствами: полнота, структурированность, релевантность, семантическая целостность, применимость, анонимность.

В исследовании сравнивались различные методы обезличивания данных: введение идентификаторов, изменение состава или семантики, декомпозиция и перемешивание. У каждого метода есть свои плюсы и минусы, но все они в той или иной степени подходят для обезличивания. Лучше всего требованиям соответствует метод перемешивания — он безоговорочно отвечает всем свойствам. Для большей защиты данных рекомендуется комбинировать несколько методов.

На основе этого анализа был создан алгоритм обезличивания персональных данных — он сочетает в себе два метода: изменение состава или семантики и перемешивание. В основе алгоритма — технологии AES/GCM, PBKDF2, HMAC, SHA256 и Base64.

Алгоритм протестировали на различных персональных данных, включая:

- ФИО, группу, курс и специальность студента;
- дату рождения;
- данные паспорта (серия, номер, дата выдачи);
- информацию об образовании (учебное заведение, дата окончания);
- адреса прописки и проживания;
- номера СНИЛС и ИНН;
- номер телефона.

Список источников

1. О персональных данных: федеральный закон от 27.07.2006 № 152-ФЗ // КонсультантПлюс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_61801/ (дата обращения: 24.03.2026).

2. Об индивидуальном (персонифицированном) учете в системах обязательного пенсионного страхования и обязательного социального страхования: федеральный закон от 01.04.1996 № 27-ФЗ // КонсультантПлюс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_9839/ (дата обращения: 21.03.2026).

3. Вопросы Федеральной службы безопасности Российской Федерации: указ Президента Российской Федерации от 11.08.2003 № 960 // Гарант. URL: <https://base.garant.ru/12132066/> (дата обращения: 24.03.2026).

4. Вопросы Федеральной службы по техническому и экспортному контролю: указ Президента Российской Федерации от 16.08.2004 № 1085 // КонсультантПлюс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_14031/ (дата обращения: 24.02.2026).

5. О Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций: постановление Правительства РФ от 16.03.2009 № 228 // КонсультантПлюс: URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_85889/ (дата обращения: 24.02.2026).

6. Об утверждении перечня мер, направленных на обеспечение выполнения обязанностей, предусмотренных Федеральным законом «О персональных данных» и принятыми в соответствии с ним нормативными правовыми актами, операторами, являющимися государственными или муниципальными органами: постановление Правительства Российской Федерации от 21.03.2012 № 211 // Гарант. URL: <https://base.garant.ru/70152982/> (дата обращения: 24.02.2026).

7. Об утверждении Положения о паспорте гражданина Российской Федерации, образца и описания бланка паспорта гражданина Российской Федерации: постановление Правительства РФ от 23.12.2023 г. № 2267 // КонсультантПлюс: URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_466454/ (дата обращения: 21.03.2026).

8. Об утверждении Порядка и условий присвоения, применения, а также изменения идентификационного номера налогоплательщика: приказ ФНС России от 29.06.2012 № ММВ-7-6/435@ // КонсультантПлюс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_134082/ (дата обращения: 21.03.2026).

9. Об утверждении требований и методов по обезличиванию персональных данных: приказ Роскомнадзора от 05.09.2013 № 996 // Консалтинг.ру. URL: <https://docs.cntd.ru/document/499043850?marker=64U0IK> (дата обращения: 24.02.2026).

10. Методические рекомендации Роскомнадзора по применению приказа Роскомнадзора от 5 сентября 2013 года № 996 «Об утверждении требований и методов по обезличиванию персональных данных» (утв. Роскомнадзором 13.12.2013) // Консалтинг.ру. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420281168> (дата обращения: 24.02.2026).

11. Особенности представления страхователями в органы ПФР отчетности, начиная с отчетности с I квартала 2013 года: информационное сообщение Пенсионного фонда Российской Федерации от 21.02.2013 г. // КонсультантПлюс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_142584/ (дата обращения: 21.03.2026).

12. DOC 9303. Машиносчитываемые проездные документы. Часть 3. Спецификации, общие для всех МСПД (дата введения: 01.01.2015) // ICAO. URL: https://www.icao.int/publications/Documents/9303_p3_cons_ru.pdf (дата обращения: 21.03.2026).

13. ГОСТ Р 34.13–2015. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Режимы работы блочных шифров (дата введения: 01.01.2016) // Защита. Госстандарт. URL: <https://protect.gost.ru/v.aspx?control=7&id=200971> (дата обращения: 14.03.2026).

14. Рекомендации по стандартизации Р 1323565.1.040–2022. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Парольная защита ключевой информации (дата введения: 01.05.2023) // Защита. Госстандарт. URL: <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&baseC=101&RegNum=53&DocOnPageCount=500&page=1&id=246142> (дата обращения: 14.03.2026).

15. Алгоритм ключевого ИИН // Кейсистемс. URL: <https://helpbks.keysystems.ru/ro/info/keyinn> (дата обращения: 21.03.2026).

16. Анохин К. Симметричный алгоритм блочного шифрования Advanced Encryption Standard. URL: <https://habr.com/ru/articles/534620/> (дата обращения: 14.03.2026).

17. Бартов Е. Как работает AES (Advanced Encryption Standard). Объяснение для гуманитариев типа меня. URL: <https://vc.ru/dev/656195-kak-rabotaet-aes-advanced-encryption-standard-obyasnenie-dlya-gumanitariyev-tipa-menya> (дата обращения: 14.03.2026).

18. Иванов Д. Переменные окружения для начинающих разработчиков, или Использование .env файла в разработке программного обеспечения. URL: <https://habr.com/ru/companies/gnivo/articles/792082/> (дата обращения: 14.03.2026).

19. Реализация алгоритма SHA-256. URL: <https://habr.com/ru/articles/729260/> (дата обращения: 14.03.2026).

20. Krawczyk H., Eronen P. HMAC-based Extract-and-Expand Key Derivation Function (HKDF) RFC 5869 // Internet Engineering Task Force. 2010. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc5869>

Дата поступления: 22.05.2026

Решение о публикации: 08.07.2026

Контактная информация:

ЗВЕРЕВА Елена Валерьевна — кандидат экон. наук, доцент кафедры «Экономика и менеджмент в строительстве»; zverelv@mail.ru

ЕШЕНКО Роман Анатольевич — кандидат техн. наук, доцент кафедры «Цифровая индустрия и защита информации»; era99@yandex.ru

ДОБРОСЕЛЬСКАЯ Екатерина Сергеевна — статистик; katya.dobroselskaya@yandex.ru

ЧУЙКО Ольга Игоревна — кандидат техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Информационные технологии»; oskar777@rambler.ru

НОВАК Яна Дмитриевна — преподаватель кафедры «Информационные технологии»; ynovak@bk.ru

Improving Privacy in Educational Data: Developing an Anonymization Algorithm Using AES/GCM and Mixing Methods

E. V. Zvereva¹, R. A. Eshenko², E. S. Dobrosel'skaya², O. I. Chuyko³, Yu. D. Novak³

¹ Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

² Far Eastern State Transport University, 47 Serisheva str., Khabarovsk, 680021, Russia

³ Khabarovsk Institute of Infocommunications, branch of the SSUTI, 73 Lenina str., Khabarovsk, 680013, Russia

For citation: Zvereva E. V., Eshenko R. A., Dobrosel'skaya E. S., Chuyko O. I., Novak Y. D. Improving Privacy in Educational Data: Developing an Anonymization Algorithm Using AES/GCM and Mixing Methods // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 3, pp. 165–187. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-165-187 (In Russian)

Abstract

Objective: to analyze existing methods and methods of depersonalization of students' personal data, as well as to develop algorithms for their depersonalization to ensure information security in educational institutions, taking into account the requirements of Russian legislation. **Methods:** comparison of existing approaches for depersonalization of personal data. A hybrid algorithm for depersonalizing personal data is proposed, which combines the method of changing the composition or semantics and the mixing method based on modern cryptographic standards. A comprehensive algorithm for depersonalization of personal data has been developed. **Results:** enabling educational organizations to legally transfer information for statistical analysis, validation of methodologies, software testing, or applied research purposes without violating the rights of data subjects, while reducing the risks of unauthorized access. **Practical significance:** a comprehensive algorithm for de-identification of personal data intended for use in the infrastructure of educational institutions has been created and experimentally substantiated. This algorithm, based on a combination of semantic structure transformation, mixing of records and the use of up-to-date cryptographic protocols and standards, provides the possibility of legitimate processing of students' personal data in compliance with regulatory requirements that are enshrined in Russian legislation on information, information security and personal data.

Keywords: depersonalization of personal data, anonymization, information security, cryptography, AES/GCM, PBKDF2, HMAC, SHA-256, Base64, mixing method, a method of changing composition or semantics

References

1. O personal'nykh dannyykh: federal'nyj zakon ot 27.07.2006 № 152-FZ [On Personal Data, Federal Law of July 27, 2006, no. 152-FZ], Consultant Plus. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_61801/ (accessed: March 24, 2026). (In Russian)
2. Ob individual'nom (personifitsirovannom) uchete v sistemakh obyazatel'nogo pensionnogo strakhovaniya i obyazatel'nogo sotsial'nogo strakhovaniya: federal'nyj zakon ot 01.04.1996 № 27-FZ [On Individual (Personified) Accounting in the Systems of Mandatory Pension Insurance and Mandatory Social Insurance, Federal Law of April 1, 1996, no. 27-FZ], Consultant Plus. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_9839/ (accessed: March 21, 2026). (In Russian)
3. Voprosy Federal'noj sluzhby bezopasnosti Rossijskoj Federatsii: ukaz Prezidenta Rossijskoj Federatsii ot 11.08.2003 № 960 [Issues of the Federal Security Service of the Russian Federation, Decree of the President of the Russian Federation of August 11, 2003, no. 960], Garant. URL: <https://base.garant.ru/12132066/> (accessed: March 24, 2026). (In Russian)
4. Voprosy Federal'noj sluzhby po tekhnicheskomu i eksportnomu kontrolyu: ukaz Prezidenta Rossijskoj Federatsii ot 16.08.2004 № 1085 [Issues of the Federal Service for Technical and Export Control, Decree of the President of the Russian Federation of August 16, 2004, no. 1085], Consultant Plus. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_14031/ (accessed: February 24, 2026). (In Russian)
5. O Federal'noj sluzhbe po nadzoru v sfere svyazi, informatsionnykh tekhnologij i massovykh kommunikatsij: postanovlenie Pravitel'stva RF ot 16.03.2009 № 228 [On the Federal Service for Supervision in the Sphere of Communications, Information Technologies, and Mass Communication, Decree of the Government of the Russian Federation of March 16, 2009, no. 228], Consultant Plus. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_85889/ (accessed: February 24, 2026). (In Russian)
6. Ob utverzhdenii perechnya mer, napravlennykh na obespechenie vypolneniya obyazannostej, predusmotrennykh Federal'nym zakonom «O personal'nykh dannyykh» i prinyatymi v sootvetstvii s nim normativnymi pravovymi aktami, operatorami, yavlyayushchimisya gosudarstvennymi ili munitsipal'nymi organami: postanovlenie Pravitel'stva Rossijskoj Federatsii ot 21.03.2012 № 211 [On Approval of the List of Measures Aimed at Ensuring Compliance with the Obligations Provided by the Federal Law “On Personal Data” and the Regulatory Legal Acts Adopted in Accordance Therewith by Operators that are State or Municipal Bodies, Decree of the Government of the Russian Federation of March 21, 2012, no. 211], Garant. URL: <https://base.garant.ru/70152982/> (accessed: February 24, 2026). (In Russian)
7. Ob utverzhdenii Polozheniya o pasporte grazhdanina Rossijskoj Federatsii, obraztsa i opisaniya blanka pasporta grazhdanina Rossijskoj Federatsii: postanovlenie Pravitel'stva RF ot 23.12.2023 g. № 2267 [On Approval of the Regulations on the Passport of a Citizen of the Russian Federation, the Model, and the Description of the Passport Blank of a Citizen of the Russian Federation, Decree of the Government of the Russian Federation of December 23, 2023, no. 2267], Consultant Plus, URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_466454/ (accessed: March 21, 2026). (In Russian)

8. Ob utverzhdenii Poryadka i uslovij prisvoeniya, primeneniya, a takzhe izmeneniya identifikatsionnogo nomera nalogoplatel'shchika: prikaz FNS Rossii ot 29.06.2012 № MMV-7-6/435@ [On Approval of the Procedure and Conditions for Assigning, Using, and Changing the Taxpayer Identification Number], Order of the Federal Tax Service of Russia of June 29, 2012, no. MMM-7-6/435@], Consultant Plus. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_134082/ (accessed: March 21, 2026). (In Russian)

9. Ob utverzhdenii trebovanij i metodov po obezlichivaniyu personal'nykh dannykh: prikaz Roskomnadzora ot 05.09.2013 № 996 [On Approval of the Requirements and Methods for Anonymizing Personal Data, Order of Roskomnadzor of September 5, 2013, no. 996], Konsalting.ru. URL: <https://docs.cntd.ru/document/499043850?marker=64U0IK> (accessed: February 24, 2026). (In Russian)

10. Metodicheskie rekomendatsii Roskomnadzora po primeneniyu prikaza Roskomnadzora ot 5 sentyabrya 2013 goda № 996 “Ob utverzhdenii trebovanij i metodov po obezlichivaniyu personal'nykh dannykh”, utv. Roskomnadzorom 13.12.2013 [Methodological Recommendations of Roskomnadzor of December 13, 2013, on the Application of the Order of Roskomnadzor of September 5, 2013, no. 996 “On Approval of the Requirements and Methods for Anonymizing Personal Data”], Konsalting.ru. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420281168> (accessed: February 24, 2026). (In Russian)

11. Osobennosti predstavleniya strakhovatelyami v organy PFR otchetnosti, nachinaya s otchetnosti s I kvartala 2013 goda: informatsionnoe soobshchenie Pensionnogo fonda Rossijskoj Federatsii ot 21.02.2013 goda [Features of Reporting by Insurers to the PFR Bodies, Starting with the Reporting for the First Quarter of 2013, Information Message of the Pension Fund of the Russian Federation of February 21, 2013], Consultant Plus. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_142584/ (accessed: March 21, 2026). (In Russian)

12. DOC 9303. Mashinoschityvaemye proezdnye dokumenty. Chast' 3. Spetsifikatsii, obshchie dlya vsekh MSPD, data vvedeniya: 01.01.2015 [DOC 9303. Machine-Readable Travel Documents. Part 3. Specifications Common to All MRTDs, date of introduction: January 1, 2015], ICAO. URL: https://www.icao.int/publications/Documents/9303_p3_cons_ru.pdf (accessed: March 21, 2026). (In Russian)

13. GOST R 34.13-2015. Informatsionnaya tekhnologiya. Kriptograficheskaya zashchita informatsii. Rezhimy raboty bloknykh shifrov, data vvedeniya: 01.01.2016 [GOST R 34.13-2015. Information Technology. Cryptographic Protection of Information. Modes of Operation for Block Ciphers], date of introduction: January 1, 2016], Zashchita. Gosstandart [Protection. Gosstandart]. URL: <https://protect.gost.ru/v.aspx?control=7&id=200971> (accessed: March 14, 2026). (In Russian)

14. Rekomendatsii po standartizatsii R 1323565.1.040-2022. Informatsionnaya tekhnologiya. Kriptograficheskaya zashchita informatsii. Parol'naya zashchita klyuchevoj informatsii, data vvedeniya: 01.05.2023 [Recommendations for Standardization R 1323565.1.040-2022. Information Technology. Cryptographic Protection of Information. Password Protection of Key Information], date of introduction: May 1, 2023], Zashchita. Gosstandart [Protection. Gosstandart]. URL:

<https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7& baseC=101& RegNum=53& DocOnPageCount=500& page=1& id=246142> (accessed: March 14, 2026). (In Russian)

15. Algoritm klyuchevaniya INN [Algorithm for Keying INN], Kejsystems. URL: <https://helpbks.keysystems.ru/ro/info/keyinn> (accessed: March 21, 2026). (In Russian)

16. Anokhin K. Simmetrichnyj algoritm blokovogo shifrovaniya Advanced Encryption Standart [Symmetric Block Encryption Algorithm Advanced Encryption Standard]. URL: <https://habr.com/ru/articles/534620/> (accessed: March 14, 2026). (In Russian)

17. Bartov E. Kak rabotaet AES (Advanced Encryption Standard). Ob"yasnenie dlya gumanitariyev tipa menya [How AES (Advanced Encryption Standard) Works. An Explanation for Humanitarians Like Me]. URL: <https://vc.ru/dev/656195-kak-rabotaet-aes-advanced-encryption-standard-obyasnenie-dlya-gumanitariyev-tipa-menya> (accessed: March 14, 2026). (In Russian)

18. Ivanov D. Peremennye okruzheniya dlya nachinayushchikh razrabotchikov, ili Ispol'zovanie .env fayla v razrabotke programmnogo obespecheniya [Environment Variables for Beginner Developers or Using a .env File in Software Development]. URL: <https://habr.com/ru/companies/gnivc/articles/792082/> (accessed: March 14, 2026). (In Russian)

19. Realizatsiya algoritma SHA-256 [Implementation of the SHA-256 Algorithm]. URL: <https://habr.com/ru/articles/729260/> (accessed: March 14, 2026). (In Russian)

20. Krawczyk H., Eronen P. HMAC-based Extract-and-Expand Key Derivation Function (HKDF) RFC 5869, Internet Engineering Task Force, 2010. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc5869>

Received: May 22, 2026

Accepted: July 08, 2026

Author's information:

Elena V. ZVEREVA — PhD in Economics, Associate Professor of the “Economics and Management in Construction” Department; zverelv@mail.ru

Roman A. ESHENKO — PhD in Engineering, Associate Professor of the “Digital Industry and Information Security Department”; era99@yandex.ru

Ekaterina S. DOBROSEL'SKAYA — Statistician; katya.dobroselskaya@yandex.ru

Ol'ga I. CHUYKO — PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the “Information Technology” Department; oskar777@rambler.ru

Yana D. NOVAK — Lecturer of the “Information Technology” Department; ynovak@bk.ru

УДК 379.85:504:528.44

Использование цифровых платформ при проведении кадастровых работ в 2026 году

А. М. Поликарпов¹, В. С. Меркушева²

¹ Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова, Россия, 194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., 5, корп. 1

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

Для цитирования: Поликарпов А. М., Меркушева В. С. Использование цифровых платформ при проведении кадастровых работ в 2026 году // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 3. С. 188–196. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-188-196

Аннотация

Цель: рассмотреть последние нововведения в государственный кадастр недвижимости, использующие цифровые методы создания, получения и обработки данных. **Методы:** анализ и синтез, мониторинг цифровых методов создания, получения и обработки данных. **Результаты:** современные цифровые методы создания, получения и обработки данных при проведении кадастровых работ позволяют получить во времени более полную информацию об объекте недвижимости в удаленном режиме.

Практическая значимость: использование цифровых платформ при проведении кадастровых работ позволяет получать актуальную информацию для ведения мониторинга земель и развития более качественного контроля за использованием земель на территории государства.

Ключевые слова: государственный кадастровый учет, государственная регистрация прав собственности, кадастровая деятельность, единый государственный реестр недвижимости

Введение

Понятие «цифровой кадастр недвижимости» становится все более значимым в связи с повышением уровня цифровых технологий в области хранения и обработки данных государством.

Актуальность темы данной статьи обуславливается ростом постановки на государственный кадастровый учет объектов недвижимости, общим ростом цифровизации государственных услуг в стране для устранения необходимости территориального личного присутствия заинтересованного лица при осуществлении прав на недвижимость.

Здесь стоит отметить несколько больших областей регулирования кадастровых работ [1, 2]:

- введение масштабной информационной платформы данных о недвижимости «Национальная система пространственных данных»;
- создание цифрового обеспечения формирования кадастровой документации;
- создание цифрового взаимодействия по внесению данных в ЕГРН.

В основе данного исследования лежит практическое изучение современных цифровых платформ обеспечения кадастровой деятельности в России.

В Российской Федерации при переходе на технологии информационного моделирования явно просматривается перспектива использования цифровых моделей как основы формирования 3D-кадастра. При этом необходимо отметить, что за рубежом в данной сфере неоднократно предпринимались попытки реализации 3D-кадастров [3, 4].

Национальная система пространственных данных (НСПД) — это российская государственная цифровая платформа для создания, сбора, хранения и предоставления пространственных данных, таких как информация о земле, недвижимости и других объектах. Проект направлен на объединение различных информационных систем и предоставление государственных услуг в сфере пространственных данных через Единый портал государственных услуг, делая их доступнее для граждан и бизнеса. Цели и задачи системы представлены на рис. 1 [5].

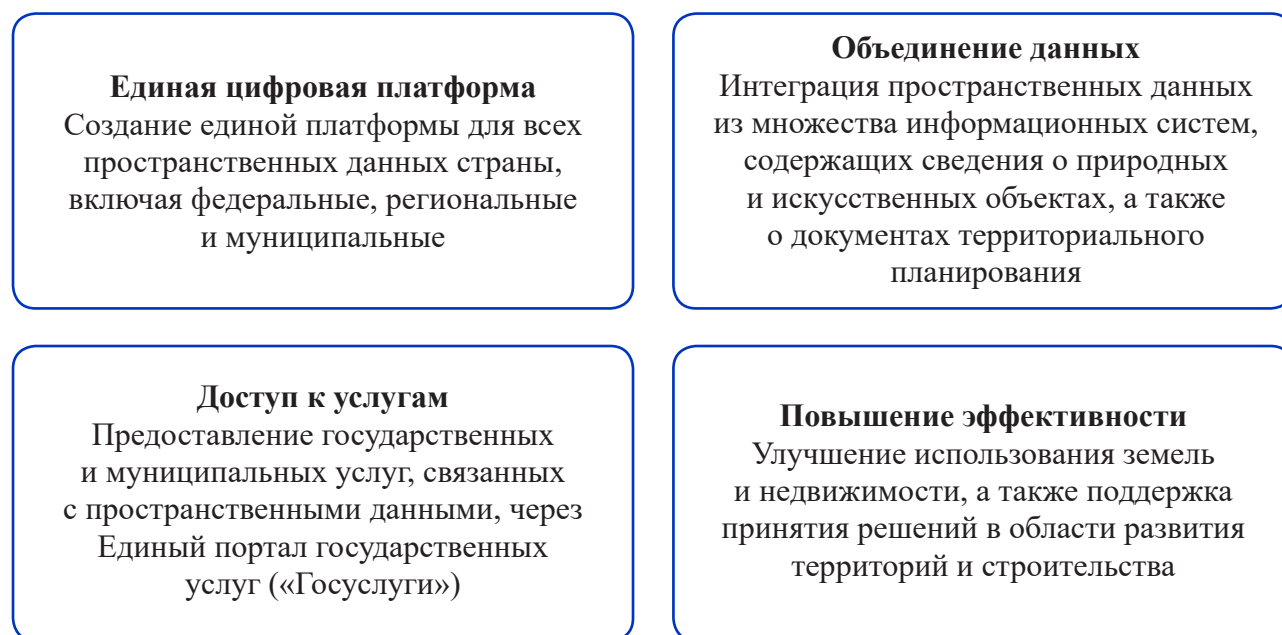


Рис 1. Цели и задачи цифровой платформы НСПД

Методология

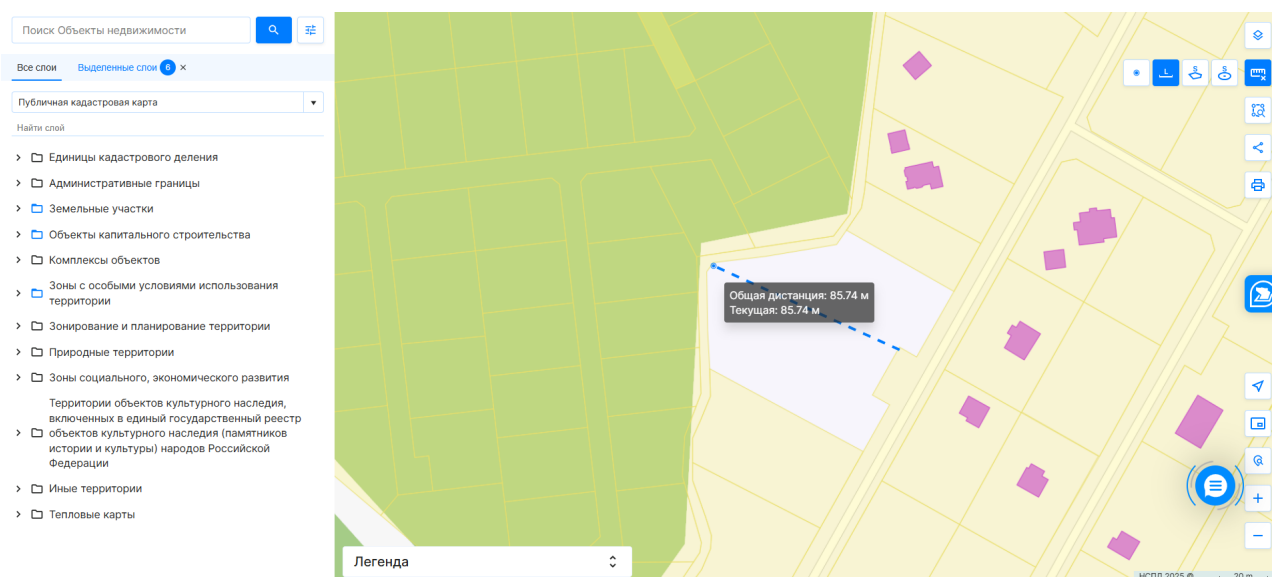
НСПД, утвержденная в 2021 году постановлением № 2148 Правительства РФ, объединяет на единой платформе важнейшие сведения об объектах недвижимости: результаты кадастровой оценки, картографический материал с определением места расположения объектов, которые согласно законодательству РФ являются недвижимостью, а также данные о зарегистрированных правах физических и юридических лиц.

В настоящее время эта платформа широко применяется пользователями информации об объектах недвижимости [6], особенно при планировании кадастровых работ:

1. Анализ спутниковых снимков территорий предстоящих кадастровых работ (рис. 2).
2. Выделение примерной области деятельности с формированием схем, актуализацией расстояний и площадей (рис. 3).
3. Получение картографического материала из Единого государственного реестра недвижимости в схемном формате, содержащем как границы участков, так и сведения об обременениях (рис. 4).
4. Обобщение всех данных с целью принятия оптимальной программы полевых и камеральных работ (рис. 5).



Рис. 2. Спутниковые данные на платформе НСПД



a



б

Рис. 3. Определение расстояния (а) и площади (б) с помощью цифровой платформы НСПД

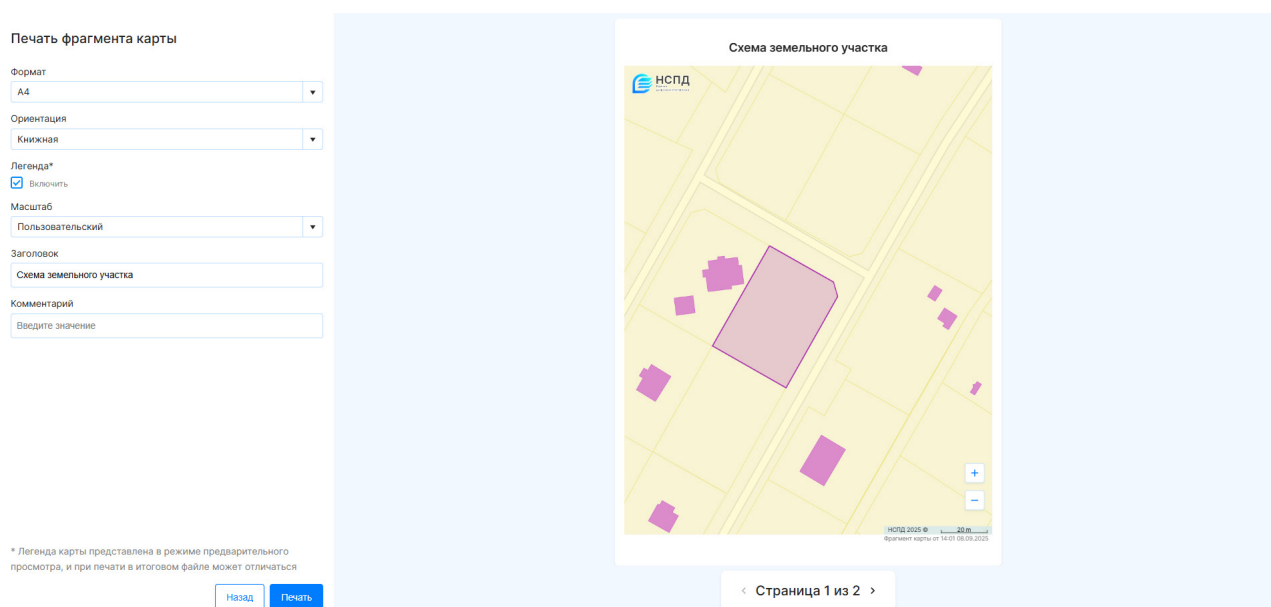


Рис. 4. Схема участка, сформированная с помощью цифровой платформы НСПД

Результаты исследования

Создание цифрового обеспечения формирования кадастровой документации на сегодняшний день производится полностью в электронном формате, в том числе на ведомственном взаимодействии. Государственными учреждениями используются геоинформационные программы (MapInfo и т. д.), а также региональные платформы обеспечения деятельности (например, РГИС и др.).

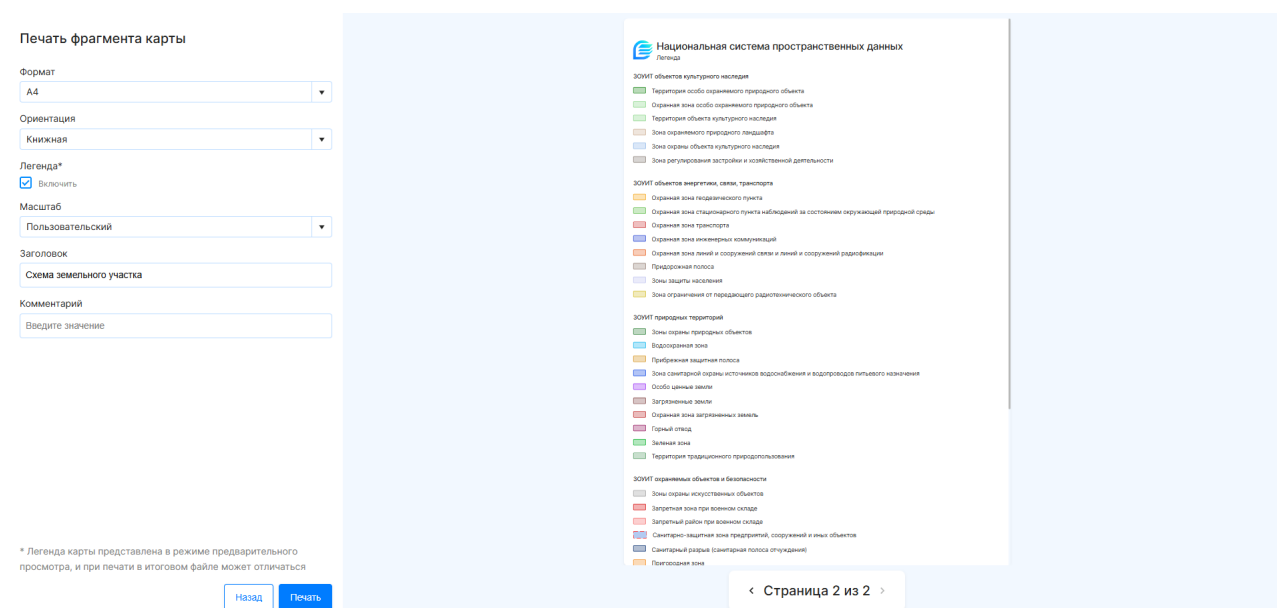


Рис. 5. Предварительные данные об объекте недвижимости, полученные с помощью цифровой платформы НСПД

Кадастровый инженер для собственных работ получает электронные документы для формирования межевого, технического плана и акта обследования. В перечень входят:

- электронный список геодезических пунктов для выполнения спутниковых геодезических измерений;
- цифровые файлы выписок из ЕГРН на объекты недвижимости, а также кадастровый план территории;
- электронные ответы необходимых государственных учреждений и ведомств, заверенных ЭЦП ответственного специалиста.

По итогу формирования кадастровой документации само взаимодействие по внесению данных в ЕГРН также осуществляется в удаленном режиме. Необходимо отметить, что в связи с нововведениями, узаконенными при принятии Федерального закона № 487-ФЗ, с марта 2025 года стандартные документы для постановки на кадастровый учет и регистрацию прав должны подаваться юридическими лицами исключительно в электронном виде [7]. Юрлицо имеет право подать на регистрацию пакет документов на бумажном носителе только в случае технической невозможности работы через электронные формы. В свою очередь, личный кабинет на портале Росреестра позволяет собственнику недвижимости производить регистрацию договоров аренды, купли-продажи, регистрацию ограничений по объекту. Все осуществляется путем подачи электронного образа документа, заверенного ЭЦП лиц, указанных в документе.

С 1 июля 2026 года вступает в законную силу Федеральный закон от 7 июня 2025 года № 133-ФЗ [8], который изменяет статью 36.2 основополагающего закона

218-ФЗ («О регистрации»). В связи с этим изменением у физических лиц появляется возможность совершения сделки с недвижимостью в дистанционном формате, используя усиленную квалифицированную электронную подпись (УКЭП) и подтверждение личности путем использования биометрических персональных данных. При этом время оформления дистанционных сделок должно сократиться весьма значительно, что положительно повлияет на рынок недвижимости.

Дополнительно стоит отметить, что цифровизация данных смежных государственных ведомств дает возможность расширения доступа к сведениям о недвижимости.

Так, с 1 сентября 2025 года в ЕГРН будут отображаться сведения о бывших членах семьи собственника, сохранивших право бессрочного проживания, что повышает прозрачность сделок [5]. С 1 сентября 2025 года станет обязательным наличие в ЕГРН сведений о границах для всех земельных участков независимо от категории и вида разрешенного использования [10].

Заключение

Интенсивное развитие цифровизации на всех стадиях кадастровой деятельности открывает широкие горизонты как для государства в целом, так и для юридических и физических лиц, а именно:

- перманентное улучшение государственной инфраструктуры, отвечающей за кадастровый учет, практически мгновенное получение сведений о различных объектах недвижимости на территории РФ;
- значительное повышение оперативности работы всех подразделений Роскадастра, что в итоге приведет как к улучшению инвестиционного климата, так и к оживлению рынка недвижимости в целом;
- серьезное увеличение достоверности данных об объектах недвижимости, включая совмещенный формат, например, данных лесного реестра и сведений ЕГРН;
- безусловное снижение ошибок кадастрового учета и регистрации прав, связанных с человеческим фактором, а также выявление нарушений, касающихся нецелевого использования земли и самозахватов земельных участков.

Список источников

1. О кадастровой деятельности: федеральный закон от 24.07.2007 № 221-ФЗ. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_70088/
2. О государственной регистрации недвижимости: федеральный закон от 13.07.2015 № 218-ФЗ. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_182661/
3. Design of the 3D Cadastre Model and Development of the Prototype in the Russian Federation / N. Vandysheva [et al.] // Proceedings 2nd International Workshop on 3D Cadastres. Delft, 2011. Pp. 355–375.

4. Stoter J., van Oosterom P., Ploeger H. The Phased 3D Cadastre Implementation in the Netherlands // Proceedings of the 3rd International Workshop on 3D Cadastres. Shenzhen, 2012. Pp. 201–218.

5. Росреестр разработает единый классификатор пространственных объектов НСПД. URL: <https://rosreestr.gov.ru/press/archive/rosreestr-razrabotaet-edinyy-klassifikator-prostranstvennykh-obektov-nspd/>

6. Традиции регионов России и развитие цифровых сервисов объединил «Умный кадастр». URL: <https://rosreestr.gov.ru/press/archive/traditsii-regionov-rossii-i-razvitie-tsifrovyykh-servisov-obedinil-umnyy-kadastr/>

7. Портал цифровой системы «Национальная система пространственных данных». URL: https://nspd.gov.ru/#top_section

8. С 1 марта 2025 года юридические лица будут подавать в Росреестр заявления и документы в целях кадастрового учета и государственной регистрации прав на недвижимость в электронной форме. URL: <https://rosreestr.gov.ru/press/archive/s-1-marta-2025-goda-yuridicheskie-litsa-budut-podavat-v-rosreestr-zayavleniya-i-dokumenty-v-tselyakh/>

9. Росреестр разъяснил новый порядок сделок с земельными участками, который начинает действовать с 1 марта 2025 года / Федеральная служба государственной регистрации, кадастра и картографии. 12.02.2025. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/411378261/>

10. О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в целях устранения ограничений для предоставления государственных и муниципальных услуг по принципу одного окна: федеральный закон от 28.07.2012 № 133-ФЗ. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_133278/

11. Росреестр подготовил дайджест законодательных изменений в сфере земли и недвижимости за II квартал 2025 года. URL: <https://rosreestr.gov.ru/press/archive/rosreestr-podgotovil-daydzhest-zakonodatelnykh-izmeneniy-v-sfere-zemli-i-nedvizhimosti-za-ii-kvartal/>

12. О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: федеральный закон от 26.12.2024 № 482-ФЗ. URL: <https://www.klerk.ru/doc/649534/>

Дата поступления: 25.06.2026

Решение о публикации: 21.07.2026

Контактная информация:

ПОЛИКАРПОВ Анатолий Михайлович — кандидат техн. наук, доцент; anatolipolikarp@mail.ru

МЕРКУШЕВА Виктория Сергеевна — кандидат экон. наук, доцент; vika.merkusheva@bk.ru

The Use of Digital Platforms in Carrying out Cadastral Works in 2026

A. M. Polikarpov¹, V. S. Merkusheva²

¹ St. Petersburg State Forestry Engineering University named after S. M. Kirov, bldg. 1, 5 Institutsky lane, 194021, St. Petersburg, Russia

² St. Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I, 9 Moskovsky ave., 190031, St. Petersburg, Russia

For citation: *Polikarpov A. M., Merkusheva V. S. The Use of Digital Platforms in Carrying out Cadastral Works in 2026 // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 3, pp. 188–196. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-188-196 (In Russian)*

Abstract

Purpose: to review the latest innovations in the state cadastre of real estate using digital methods of creating, receiving and processing data. **Methods:** analysis and synthesis, monitoring. Digital methods of creating, receiving and processing data. **Results:** modern digital methods of creating, receiving and processing data during cadastral work make it possible to obtain more complete information about a real estate object remotely in time. **Practical significance:** the use of digital platforms in carrying out cadastral work allows obtaining up-to-date information for monitoring land and developing better control over land use in the territory of the state.

Keywords: state cadastral registration, state registration of property rights, cadastral activity, unified state register of real estate

References

1. O kadastrovoj deyatel'nosti: federal'nyj zakon ot 24.07.2007 № 221-FZ. [On Cadastral Activities, Federal Law, dated July 24, 2007, no. 221-FZ]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_70088/ (In Russian)
2. O gosudarstvennoj registratsii nedvizhimosti: federal'nyj zakon ot 13.07.2015 № 218-FZ [On the State Registration of Real Estate, Federal Law, dated July 13, 2015, no. 218FZ]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_182661/ (In Russian)
3. Vandysheva N., et al. Design of the 3D Cadastre Model and Development of the Prototype in the Russian Federation, Proceedings of the 2nd International Workshop on 3D Cadastres, Delft, 2011, pp. 355–375.
4. Stoter J., van Oosterom P., Ploeger H. The Phased 3D Cadastre Implementation in the Netherlands, Proceedings of the 3rd International Workshop on 3D Cadastres, Shenzhen, 2012, pp. 201–218.
5. Rosreestr razrabotaet edinyj klassifikator prostranstvennykh ob"ektov NSPD [Rosreestr Will Develop a Unified Classifier of Spatial Objects for the National Spatial Data System]. URL: <https://rosreestr.gov.ru/press/archive/rosreestr-razrabotaet-edinyy-klassifikator-prostranstvennykh-obektov-nspd/> (In Russian)
6. Traditsii regionov Rossii i razvitie tsifrovyyh servisov ob"edinil "Umnyj kadastr" [Traditions of Russian Regions and the Development of Digital Services Are United by the "Smart Cadastre"].

URL: <https://rosreestr.gov.ru/press/archive/traditsii-regionov-rossii-i-razvitie-tsifrovyykh-servisov-obedinil-umnyy-kadastr/> (In Russian)

7. Portal tsifrovoj sistemy “Natsional'naya sistema prostranstvennykh dannykh” [Portal of the Digital System “National Spatial Data System”]. URL: https://nspd.gov.ru/#top_section (In Russian)

8. S 1 marta 2025 goda yuridicheskie litsa budut podavat' v Rosreestr zayavleniya i dokumenty v tselyakh kadaastrovogo ucheta i gosudarstvennoj registratsii prav na nedvizhimost' v elektronnoy forme [Starting March 1, 2025, Legal Entities Will Submit Applications and Documents to Rosreestr for Cadastral Registration and State Registration of Property Rights in Electronic Form]. URL: <https://rosreestr.gov.ru/press/archive/s-1-marta-2025-goda-yuridicheskie-litsa-budut-podavat-v-rosreestr-zayavleniya-i-dokumenty-v-tselyakh/> (In Russian)

9. Rosreestr raz'yasn'il novyy poryadok sdelok s zemel'nymi uchastkami, kotoryj nachinaet dejstvovat' s 1 marta 2025 goda [Rosreestr Explained the New Procedure for Land Transactions, Which Will Come into Effect on March 1, 2025], Federal'naya sluzhba gosudarstvennoj registratsii, kadastra i kartografii. 12.02.2025 [Federal Service for State Registration, Cadastre and Cartography, February 12, 2025]. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/411378261/> (In Russian)

10. O vnesenii izmenenij v otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossijskoj Federatsii v tselyakh ustraneniya ogranichenij dlya predostavleniya gosudarstvennykh i munitsipal'nykh uslug po printsipu odnogo okna: federal'nyj zakon ot 28.07.2012 № 133-FZ [On Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation to Remove Restrictions for Providing State and Municipal Services under the “Single Window” Principle, Federal Law of July 28, 2012, no. 27-FZ]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_133278/ (In Russian)

11. Rosreestr podgotovil dajdzhest zakonodatel'nykh izmenenij v sfere zemli i nedvizhimosti za II kvartal 2025 goda [Rosreestr Prepared a Digest of Legislative Changes in the Field of Land and Real Estate for the Second Quarter of 2025]. URL: <https://rosreestr.gov.ru/press/archive/rosreestr-podgotovil-daydzhest-zakonodatelnykh-izmeneniy-v-sfere-zemli-i-nedvizhimosti-za-ii-kvartal/> (In Russian)

12. O vnesenii izmenenij v otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossijskoj Federatsii: federal'nyj zakon ot 26.12.2024 № 482-FZ [On Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation, Federal Law of December 26, 2024, no. 482FZ]. URL: <https://www.klerk.ru/doc/649534/> (In Russian)

Received: June 25, 2026

Accepted: July 21, 2026

Author's information:

Anatolij M. POLIKARPOV — PhD in Engineering, Associate Professor; anatolipolikarp@mail.ru

Viktoriya S. MERKUSHEVA — PhD in Economics, Associate Professor; vika.merkusheva@bk.ru

УДК 625.1

Влияние надежности строительных рабочих на производительность комплектов землеройно-транспортной техники

Н. М. Панченко

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

Для цитирования: Панченко Н. М. Влияние надежности строительных рабочих на производительность комплектов землеройно-транспортной техники // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 3. С. 197–205. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-197-205

Аннотация

Цель: для получения качественной строительной продукции в установленные проектом сроки необходимо эффективное функционирование строительных процессов. Сроки строительства напрямую зависят от производительности техники, участвующей в процессе строительства. На производительность воздействует множество различных факторов. Часть из них регламентирована нормативной документацией, однако некоторые аспекты, такие как человеческий фактор (в частности, надежность строительных рабочих), остаются неучтенными. Целью представленного исследования является выявление закономерностей влияния этого показателя на эффективность работы строительных машин. **Методы:** использованы методы экономико-математического моделирования. Расчеты выполнены с применением формул теории надежности, теории вероятности и теории массового обслуживания. **Результаты:** определены производительности комплектов землеройно-транспортной техники и отдельных машин в комплектах с учетом надежности рабочих. По результатам расчетов построены графические зависимости производительности комплектов техники и отдельных машин в комплектах с учетом надежности рабочих для диапазона дальности возки грунта 0,5–2 км. Выявлено влияние надежности строительных рабочих на производительность строительной техники и его закономерности. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть полезны руководителям организаций в области транспортного строительства. Они помогут оценить возможности организации выполнять качественно и в установленные сроки заданные объемы работ с учетом такого важного фактора, как влияние надежности строительных рабочих на производительность техники.

Ключевые слова: надежность, отказ, восстановление, вероятность безотказной работы, производительность, строительный процесс, скрепер, бульдозер

Вопросы взаимодействия людей и техники в человеко-технических системах (ЧТС), надежности строительных процессов и их составляющих стали актуальными еще в начальный период развития комплексной механизации, автоматизации, точности в строительстве и до настоящего времени не теряют своей актуальности.

Исследованиям надежности производственных процессов посвящен ряд трудов отечественных и зарубежных ученых. Например, А. Б. Крейман указывает на связь эффективности строительных потоков с их надежностью и предлагает включить в ПОС и ППР показатели надежности. О. Б. Белецкий предлагает алгоритмы решения задач проектирования строительных потоков с заданной надежностью и сроком строительства на основе методов статистического моделирования.

В работах А. А. Гусакова обоснована необходимость исследования надежности на всех стадиях строительства и использования для этого теории надежности в качестве математического аппарата. Труды Э. С. Спиридонова по организационно-технологической надежности определяют способность строительных систем выполнять заданные функции в установленные сроки с надлежащим качеством.

Теме организационно-технологической надежности посвящены труды литовского ученого Э. К. Завадскаса. Иранский ученый А. Хаджсаид известен своими разработками в области гибридного моделирования, совмещающего дискретно-событийные модели строительных площадок с агентным моделированием поведения рабочих и техники. Ведущий канадский исследователь С. Лухунаге создал передовые программные комплексы для компьютерного моделирования строительных операций, которые позволяют прогнозировать риски, сроки и затраты крупных инфраструктурных проектов.

Однако в перечисленных выше исследованиях учет роли человека производится в основном на уровне определения трудозатрат, а влияние рабочих на изменение производительности строительных процессов, динамика воздействия обратных связей в ЧТС, влияние технологии и отказов элементов в одних процессах на производительность других, связанных с ними, не учитываются. При подведении итога анализа научных трудов в области надежности строительных процессов и взаимодействия человека и техники следует отметить, что они внесли огромный вклад в решение данной проблемы и являются научной и методологической основой для дальнейших исследований в данной области.

Целью представленного исследования является выявление влияния надежности строительных рабочих на производительность комплектов землеройно-транспортной техники и его закономерностей. В качестве математического аппарата были использованы формулы теории вероятности, теории надежности, для формализации исследуемых строительных процессов применялись системы уравнений А. Н. Колмогорова и их решения, а также методы экономико-математического моделирования.

Задачей любой строительной организации является своевременная сдача построенных объектов надлежащего качества в эксплуатацию. Для того чтобы добиться положительного результата, необходимо надежное функционирование всех строительных процессов [1]. Рассмотрим, например, процесс возведения земляного полотна землеройно-транспортной техникой, а именно скреперными комплектами. Любой строительный процесс обладает всеми свойствами и признаками больших систем, поэтому к нему может быть применен системный подход. Каждая большая система включает в себя составляющие ее подсистемы [2].

В случае строительных систем их составляющие — это не только сложные машины и оборудование, задействованные в технологических процессах, но еще и рабочие, управляющие техникой. Поэтому такие системы и принято

называть человеко-техническими. Надежность техники, такие показатели, как вероятность безотказной работы и отказа, его продолжительность, а также время, которое потребуется на восстановление, оказывают ощутимое влияние на качество функционирования строительных процессов и производительность самой техники, работающей в комплекте [3]. Но и к деятельности человека в составе ЧТС можно применить некоторые показатели, часто применяемые к техническим системам.

Например, невыход на работу можно воспринимать как отказ, продолжительность больничного листа — как продолжительность восстановления, можно рассчитать вероятность безотказной работы и другие показатели [4]. Поэтому будет рациональным учитывать влияние на производительность комплектов строительных машин и самого процесса в целом надежности не только техники, но и рабочих, участвующих в производственном процессе.

Исследуем, какое влияние оказывает надежность строительных рабочих на производительность комплектов землеройно-транспортной техники. Для этого рассмотрим несколько таких комплектов:

- 1 скрепер и 1 бульдозер;
- 2 скрепера и 1 бульдозер;
- 4 скрепера и 2 бульдозера;
- 6 скреперов и 3 бульдозера.

Марку и вместимость ковша скрепера выберем наиболее часто используемые в транспортном строительстве: Caterpillar 613B $q = 8,4 \text{ м}^3$, работающие в комплекте с бульдозерами Komatsu D65EX16. Выполним расчет производительности ведущих машин в выбранных комплектах с учетом надежности строительных рабочих, при условии что техника в комплектах используется новая, поэтому, согласно статистике, вероятность безотказной работы для нее максимальна и равна 0,85, а состав рабочих может быть разнообразным по возрасту и здоровью. Вероятность их безотказной работы находится в диапазоне от максимальной до минимальной — 0,95–0,75 (с интервалом 0,05) для расстояния дальности возки грунта 0,5–2,0 км (с интервалом 0,5 км). Результаты расчета представлены в таблице.

По полученным результатам построим графические зависимости (рис. 1 и 2).

Анализируя зависимости, можно сделать следующие выводы: вид графиков близок к линейному. Чем меньше расстояние дальности возки грунта, тем выше производительность скрепера. С увеличением количества скреперов в комплекте вероятность безотказной работы людей начинает оказывать все меньшее влияние на производительность каждого конкретного скрепера [5]. Так, например, при изменении вероятности безотказной работы людей с 0,75 до 0,95 производительность скрепера, который работает в комплекте, включающем 1 скрепер и 1 бульдозер, вырастет на 12,9% при расстоянии дальности возки грунта 0,5 км.

ТАБЛИЦА. Производительность скреперов Caterpillar 613В $q = 8,4 \text{ м}^3$, работающих в комплекте с бульдозерами, с учетом вероятности безотказной работы людей

Расстояние, км	Производительность с учетом вероятности безотказной работы людей в диапазоне 0,95–0,75, $\text{м}^3/\text{ч}$				
	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75
Комплект: 1 скрепер и 1 бульдозер					
0,5	317,8	307,1	297,5	289,0	281,3
1,0	153,9	148,8	144,1	140,0	136,3
1,5	75,8	73,3	70,9	68,9	67,1
2,0	57,6	55,6	53,9	52,3	50,9
Комплект: 2 скрепера и 1 бульдозер					
0,5	326,3 652,5	318,2 636,4	311,3 622,6	305,1 610,3	300,2 600,3
1,0	158,1 316,2	154,2 308,4	150,8 301,7	147,9 295,7	145,4 290,9
1,5	77,8 155,7	75,9 151,8	74,3 148,5	72,8 145,6	71,6 143,2
2,0	59,1 118,2	57,6 115,3	56,4 112,8	55,3 110,5	54,4 108,7
Комплект: 4 скрепера и 2 бульдозера					
0,5	342,8 1371,0	338,5 1354,2	335,5 1341,9	332,8 1331,1	330,5 1321,9
1,0	166,1 664,3	164,0 656,1	162,5 650,2	161,2 644,9	160,1 640,5
1,5	81,8 327,1	80,8 323,1	80,0 320,1	79,4 317,6	78,8 315,4
2,0	62,1 248,3	61,3 245,3	60,8 243,0	60,3 241,1	59,9 239,4
Комплект: 6 скреперов и 3 бульдозера					
0,5	350,8 2104,9	348,5 2091,1	346,6 2079,6	345,1 2070,4	343,9 2063,5
1,0	169,9 1019,9	168,9 1013,2	167,9 1007,6	167,2 1003,2	166,6 999,8
1,5	83,7 502,2	81,3 498,9	82,7 496,1	82,3 493,9	82,0 492,3
2,0	63,5 381,2	63,1 378,7	62,8 376,7	62,5 374,9	62,3 373,7

Примечание: верхняя цифра в ячейке «Производительность» — производительность одного (каждого) скрепера в комплекте, нижняя цифра — производительность комплекта.

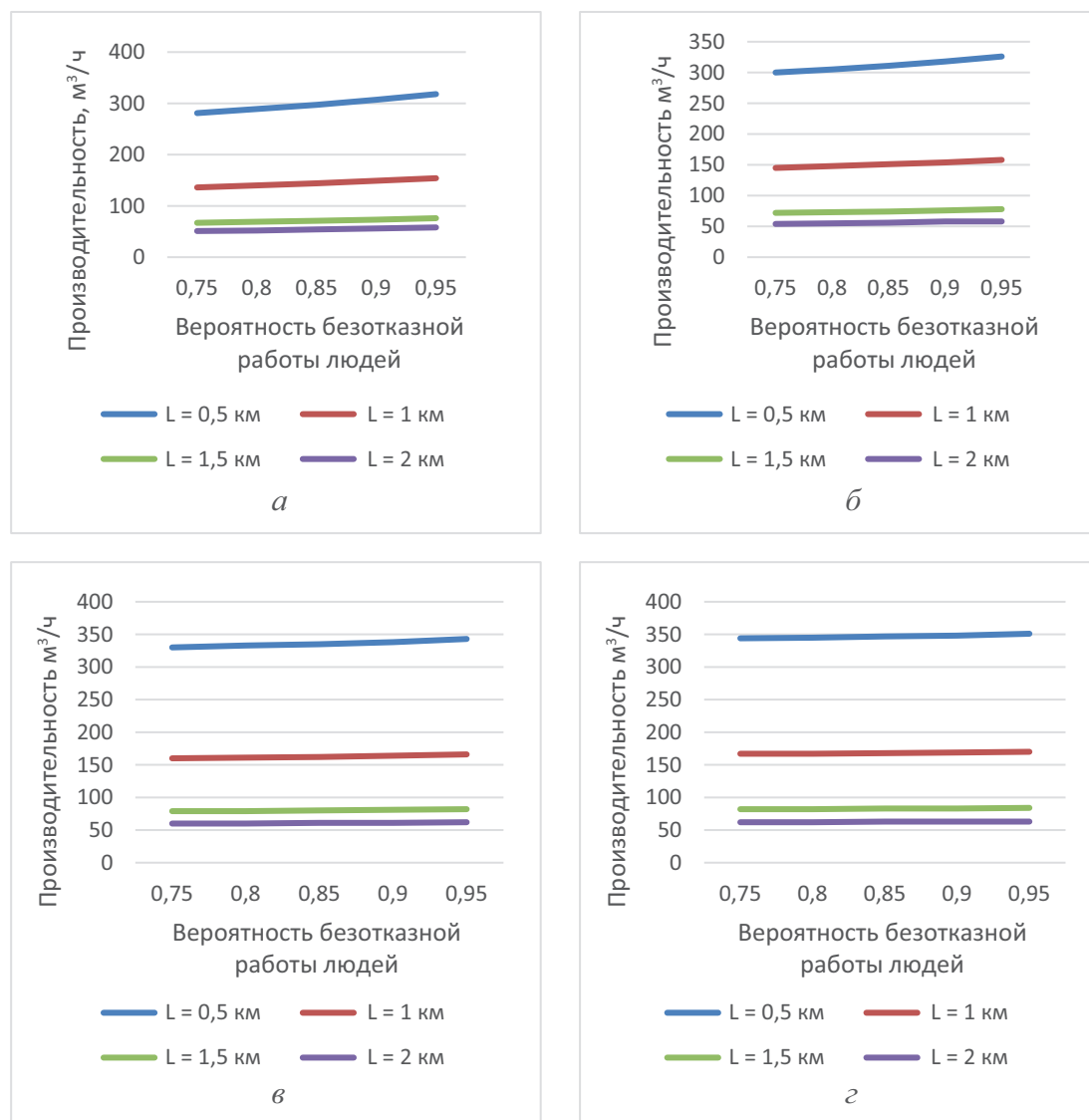


Рис. 1. Производительность одного (каждого) скрепера с учетом надежности людей, работающего в комплекте: а — 1 скрепер и 1 бульдозер; б — 2 скрепера и 1 бульдозер; в — 4 скрепера и 2 бульдозера; г — 6 скреперов и 3 бульдозера

При тех же условиях, но в комплекте из 2 скреперов и 1 бульдозера производительность каждого скрепера вырастет на 8,7%, в комплекте из 4 скреперов и 2 бульдозеров — уже на 3,7%, а в комплекте из 6 скреперов и 3 бульдозеров — только на 2%. Причем увеличение дальности возки грунта практически не меняет влияние надежности людей на производительность скреперов [6]. При дальности возки грунта 2 км для тех же самых комплектов возрастание производительности будет на 13,2; 8,6; 3,7 и 1,9% соответственно.

Получается, что чем больше машин с машинистами задействовано в комплекте, тем меньшее влияние оказывает надежность отдельно взятых рабочих на производительность каждой машины в комплекте за счет резервирования людей и техники [7].

На рис. 2 показаны зависимости производительности скреперных комплектов с учетом надежности людей при вероятности безотказной работы машинистов 0,75–0,85 для вышеуказанных комплектов при дальности возки грунта 0,5–2 км.

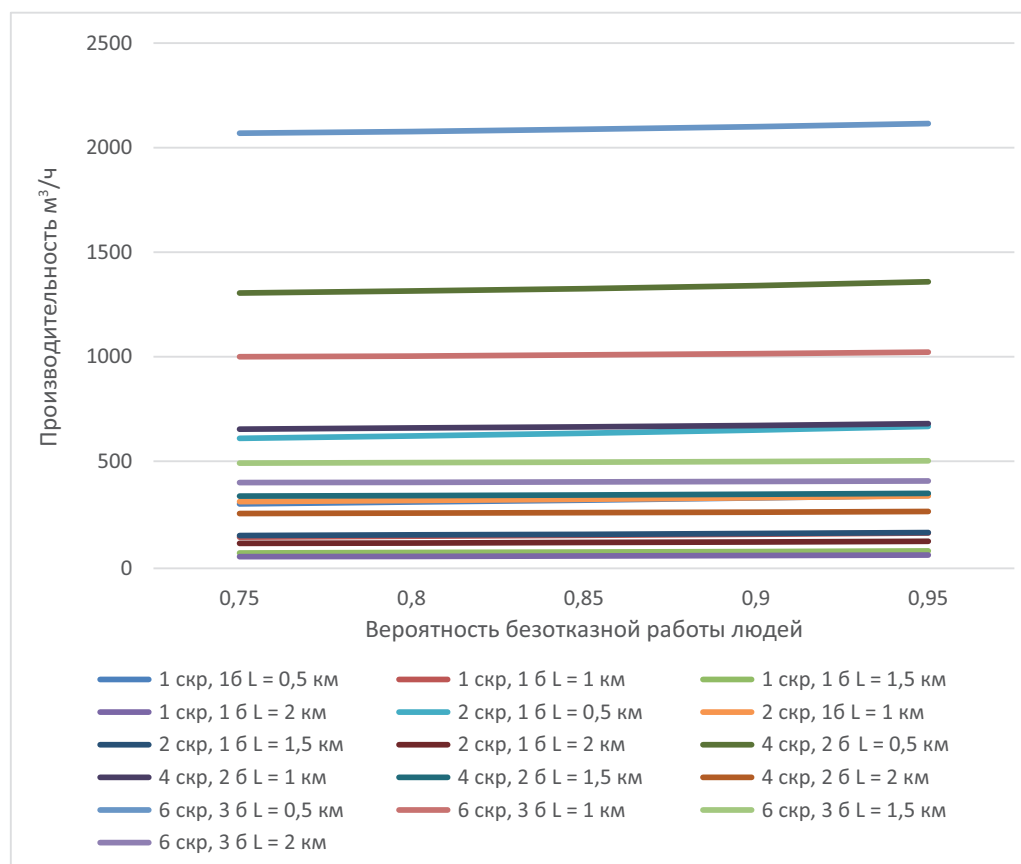


Рис. 2. Производительность скреперных комплектов с учетом надежности людей для комплектов: 1 скрепер и 1 бульдозер, 2 скрепера и 1 бульдозер, 4 скрепера и 2 бульдозера, 6 скреперов и 3 бульдозера при дальности возки грунта 0,5–2 км

Исследуя полученные зависимости, видим, что производительность комплектов машин становится тем выше, чем больше в комплекте машин и чем меньше расстояние дальности возки. Производительность комплекта меньше подвержена влиянию вероятности безотказной работы людей, чем больше машин в комплекте [8]. Кроме того, можно обратить внимание на то, что некоторые комплекты машин при определенных условиях оказываются конкурентоспособными по производительности [9].

Например, близкую по значениям производительность имеют комплекты, состоящие:

- из 2 скреперов и 1 бульдозера при $L = 1$ км; 1 скрепера и 1 бульдозера при $L = 0,5$ км;
- из 1 скрепера, 1 бульдозера при $L = 1$ км; 2 скреперов и 1 бульдозера при $L = 1,5$ км;

- из 2 скреперов и 1 бульдозера при $L = 0,5$ км; 4 скреперов и 2 бульдозеров при $L = 1$ км;
- из 4 скреперов и 2 бульдозеров при $L = 1,5$ км; 2 скреперов и 1 бульдозера при $L = 0,7$ км.

То есть определив комплекты, которые могут работать с одинаковой производительностью, можно добиться выбора строительной техники, которая при правильной организации даст возможность выполнить все необходимые работы в заданные сроки, не сорвав их, даже если у производителя в наличии несколько однотипных машин и нет возможности использовать разные марки и типоразмеры техники. Если же выполнить подобный расчет для нескольких марок и типоразмеров скреперов, то можно получить внушительный список конкурентоспособной техники для использования строительными организациями [10]. Но даже данные графических зависимостей, приведенные на рис. 1 и 2, дают представление, какую производительность будет иметь каждая машина в комплекте и комплект в целом при заданной дальности возки грунта и при определенной вероятности безотказной работы машинистов.

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы: надежность рабочих оказывает не меньшее влияние на производительность комплектов строительной техники, чем надежность самой техники. При этом чем меньше одноименных скреперов работает в комплекте техники, тем значительнее влияние надежности рабочих на производительность каждой из машин и наоборот: чем больше одноименных машин в комплекте, тем слабее влияние надежности на производительность каждой машины. Определены комплекты машин, при определенных условиях конкурирующих по производительности. Полученные результаты позволяют оценить влияние надежности рабочих в комплектах строительной техники и повысить производительность как самих комплектов, так и каждой машины в них, а также могут быть полезны руководителям организаций в области транспортного строительства при формировании комплектов техники для реализации строительных процессов.

Список источников

1. Информационные модели функциональных систем / под ред. К. В. Судакова и А. А. Гусакова. М.: Фонд «Новое тысячелетие», 2004. 304 с.
2. Гусаков А. А., Гинзбург А. В., Веремеенко С. А. Организационно-технологическая надежность строительства. М.: Внешторгиздат, 1994. 472 с.
3. Гусаков А. А., Монфред Ю. Б., Прыкин Б. В. Моделирование организационно-технологической надежности строительства. М.: SVR-Аргус, 1994. 472 с.
4. Половко А. М., Гуров С. В. Основы теории надежности. СПб.: БХВ-Петербург, 2008. 704 с.
5. Спиридонов Э. С., Максимов А. В. Научные основы оптимизации организации и управления комплексом работ по переустройству транспортных объектов. М.: Известия, 1998. 290 с.

6. Дроздова Н.В. Экономико-математическое моделирование. Ярославль: ЯрГУ, 2010. 246 с.
7. Катарыгин Н.В. Экономико-математическое моделирование. СПб.: Лань, 2022. 256 с.
8. Акулич И.Л. Математическое программирование в примерах и задачах. СПб.: Лань, 2011. 352 с.
9. Панченко Н.М., Басовский Д.А. Влияние надежности элементов строительного процесса на сроки строительства // Бюллетень результатов научных исследований. 2025. № 3. С. 167–175.
10. Панченко Н.М., Басовский Д.А. К вопросу выбора наиболее рационального сочетания землеройной и транспортной техники при производстве земляных работ // Бюллетень результатов научных исследований. 2023. № 1. С. 19–25.

Дата поступления: 25.06.2026

Решение о публикации: 08.07.2026

Контактная информация:

ПАНЧЕНКО Наталия Михайловна — кандидат техн. наук, доцент; panchnat@rambler.ru

The Influence of the Reliability of Construction Workers on the Productivity of Sets Of Earthmoving and Transport Equipment

N. M. Panchenko

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Panchenko N. M. The Influence of the Reliability of Construction Workers on the Productivity of Sets of Earthmoving and Transport Equipment // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 3, pp. 197–205. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-197-205 (In Russian)*

Abstract

Objective: to ensure high-quality construction products within the time frame set by the project, effective functioning of construction processes is necessary. The construction time directly depends on the performance of the machinery involved in the construction process. Performance is influenced by many different factors. A number of factors are taken into account in the regulatory documentation. However there are also those that are not taken into account, for example, the reliability of construction workers. The purpose of this study is to identify the impact of the reliability of construction workers on the performance of construction machinery and its patterns. **Methods:** methods of economic and mathematical modeling were used, calculations were performed using formulas from reliability theory, probability theory, and queuing theory. **Results:** the productivity of sets of earthmoving and transport equipment and individual machines in sets is determined, taking into account the reliability of workers. Based on the calculation results, graphical dependences of the productivity of sets of equipment and individual machines in sets are constructed, taking into account the reliability of workers for a ground transportation range of 0.5–2 km of ground transportation. The influence of the reliability of construction workers on the productivity of construction machinery and its patterns is revealed. **Practical significance:** the results obtained can be useful to the heads of organizations in the field of transport construction. They will help to assess the organization's ability to perform specified amounts of work efficiently and on time, taking into account such an important factor as the impact of the reliability of construction workers on the productivity of machinery.

Keywords: reliability, failure, recovery, probability of uptime, productivity, construction process, scraper, bulldozer

References

1. Informatsionnye modeli funktsionalnykh sistem [Information Models of Functional Systems] / ed. by A. A. Gusakov, Sudakov K. V. Moscow, Foundation “Novoe Tysyacheletie”, 2004, 304 p. (In Russian)
2. Gusakov A. A., Ginzburg A. V., Veremeenko S. A. Organizatsionno-tekhnologicheskaya nadezhnost' stroitelstva [Organizational and Technological Reliability of Construction], Moscow, Vneshtorgizdat [Foreign Trade Publishing House], 1994, 472 p. (In Russian)
3. Gusakov A. A., Monfred Yu. B., Prykin B. V. Modelirovanie organizatsionno-tekhnologicheskoy nadezhnosti stroitelstva [Modeling Organizational and Technological Reliability of Construction], Moscow, SVR-Argus, 1994, 472 p. (In Russian)
4. Polovko A. M., Gurov S. V. Osnovy teorii nadezhnosti [Fundamentals of Reliability Theory], St. Petersburg, BHV-Peterburg, 2008, 704 p. (In Russian)
5. Spiridonov E. S., Maksimov A. V. Nauchnye osnovy optimizatsii organizatsii i upravleniya kompleksom rabot po pereustroystvu transportnykh obektov [Scientific Foundations for Optimizing the Organization and Management of Work Complexes for the Reconstruction of Transport Facilities], Moscow, Izvestiya [Izvestia], 1998, 290 p. (In Russian)
6. Drozdova N. V. Ekonomiko-matematicheskoe modelirovanie [Economic and Mathematical Modeling], Yaroslavl, YarGU [Yaroslavl State University], 2010, 246 p. (In Russian)
7. Katarygin N. V. Ekonomiko-matematicheskoe modelirovanie [Economic and Mathematical Modeling], St. Petersburg, Lan' [Lan Publishing House], 2022, 256 p. (In Russian)
8. Akulich I. L. Matematicheskoe programmirovaniye v primerakh i zadachakh [Mathematical Programming in Examples and Problems], St. Petersburg, Lan' [Lan Publishing House], 2011, 352 p. (In Russian)
9. Panchenko N. M., Basovskiy D. A. Vliyanie nadezhnosti elementov stroitel'nogo protsessa na sroki stroitelstva [The Influence of the Reliability of Construction Process Elements on Construction Timelines], *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy [Bulletin of Scientific Research Results]*, 2025, no. 3, pp. 167–175. (In Russian)
10. Panchenko N. M., Basovskiy D. A. K voprosu vybora naibolee ratsional'nogo sochetaniya zemleroy noy i transportnoy tekhniki pri proizvodstve zemlyanykh rabot [On the Issue of Selecting the Most Rational Combination of Earthmoving and Transport Equipment for Earthwork Operations], *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy [Bulletin of Scientific Research Results]*, 2023, no. 1, pp. 19–25. (In Russian)

Received: June 25, 2026

Accepted: July 08, 2026

Author's information:

Nataliya M. PANCHENKO — PhD in Engineering, Associate Professor; panchnat@rambler.ru

УДК 625.1

Оценка влияния надежности элементов строительного процесса на производительность ведущей машины в комплектах землеройно-транспортной техники

Н. М. Панченко, Д. А. Басовский

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

Для цитирования: Панченко Н. М., Басовский Д. А. Оценка влияния надежности элементов строительного процесса на производительность ведущей машины в комплектах землеройно-транспортной техники // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 3. С. 206–214. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-206-214

Аннотация

Цель: выявить влияние, которое оказывает надежность элементов строительного процесса на производительность ведущей машины в комплектах землеройно-транспортной техники. На примере наиболее востребованных и современных моделей строительных машин качественно и количественно оценить, как влияет надежность на их производительность. **Методы:** каждый строительный процесс рассматривается и оценивается с точки зрения теории больших систем. Все исследуемые технологические процессы для удобства расчетов представлены в виде структурных моделей. В качестве математического аппарата используется методика решения больших систем академика А. Н. Колмогорова. **Результаты:** построены структурные модели технологических процессов разработки и транспортирования грунта землеройно-транспортными машинами. На основе структурных моделей выполнен расчет производительности рассматриваемых комплектов техники с учетом надежности. По результатам расчетов построены графические зависимости, которые наглядно показывают характер влияния надежности на производительность комплектов техники. Рассчитана производительность с учетом надежности для скрепера наиболее востребованной у строителей марки, работающего в комплектах, для диапазона дальности возки от 0,5 до 2 км. **Практическая значимость:** результаты исследования могут быть полезны руководителям организаций транспортного строительства для грамотного выбора комплектов землеройно-транспортной техники, понимания возможной производительности ведущей машины в комплекте, а также для реальных сроков строительства.

Ключевые слова: производительность, вероятность безотказной работы, структурная модель, надежность, технологический процесс, скрепер, бульдозер

Проблема надежности строительных процессов является актуальной для транспортного строительства и строительства в целом. От нее зависят производительность и сроки выполнения работ, качество возводимых объектов. А само понятие надежности в области строительства касается строительных конструкций, организационно-технологического процесса, элементов, составляющих структуру строительных процессов. Вопросам надежности в области техники и строительства посвящены работы известных отечественных ученых, таких как А. А. Гусakov, А. В. Гинзбург, В. М. Лебедев, В. И. Неснов, а также зарубежных О. Ditlevsen и Н. О. Madsen (Дания), А. М. Freudenthal (США), А. М. Hasofer (Австралия).

Однако современная нормативная документация не учитывает, как надежность элементов строительного процесса влияет на производительность строительных машин. Это приводит к неточности расчетов. Поэтому авторы предлагают методику практического расчета производительности ведущей машины в комплектах землеройно-транспортной техники. Она учитывает надежность элементов строительного процесса и позволяет оценить ее влияние на производительность.

При строительстве транспортных объектов наряду с универсальными комплектами землеройной техники часто применяют комплекты землеройно-транспортной техники, например скреперные. Рассмотрим наиболее распространенные в дорожном строительстве скреперные комплекты. Они включают разное количество скреперов, которые работают совместно с бульдозерами.

Для исследования влияния надежности элементов строительного процесса на производительность проанализируем процесс разработки и транспортирования грунта с использованием следующих вариантов скреперных комплектов:

- 1 скрепер и 1 бульдозер;
- 1 скрепер (без использования бульдозера);
- 2 скрепера и 1 бульдозер;
- 4 скрепера и 2 бульдозера;
- 6 скреперов и 3 бульдозера.

Так как любой строительный процесс обладает всеми признаками и свойствами системы, будем рассматривать выбранный нами для исследования процесс разработки и транспортирования грунта скреперным комплектом с точки зрения системного подхода [1].

Для наглядности представления функционирования каждого из скреперных комплектов составим структурные модели технологического процесса [2].

Структурные модели показаны на рис. 1.

Используя структурные модели, представленные на рис. 1, и математический аппарат решения больших систем академика А. Н. Колмогорова, можем рассчитать в долях условной единицы производительность каждого технологического процесса, изображенного на рис. 1. Для расчета примем вероятность безотказной работы техники в диапазоне от 0,85 (статистическая вероятность безотказной работы новой техники) до 0,75 (статистическая вероятность безотказной работы техники, сниженная в процессе эксплуатации, до проведения капитального ремонта) с интервалом 0,02. Вероятность безотказной работы людей, задействованных в технологических процессах, примем максимальной и равной 0,95 [3].

Результаты расчета представлены в табл. 1.

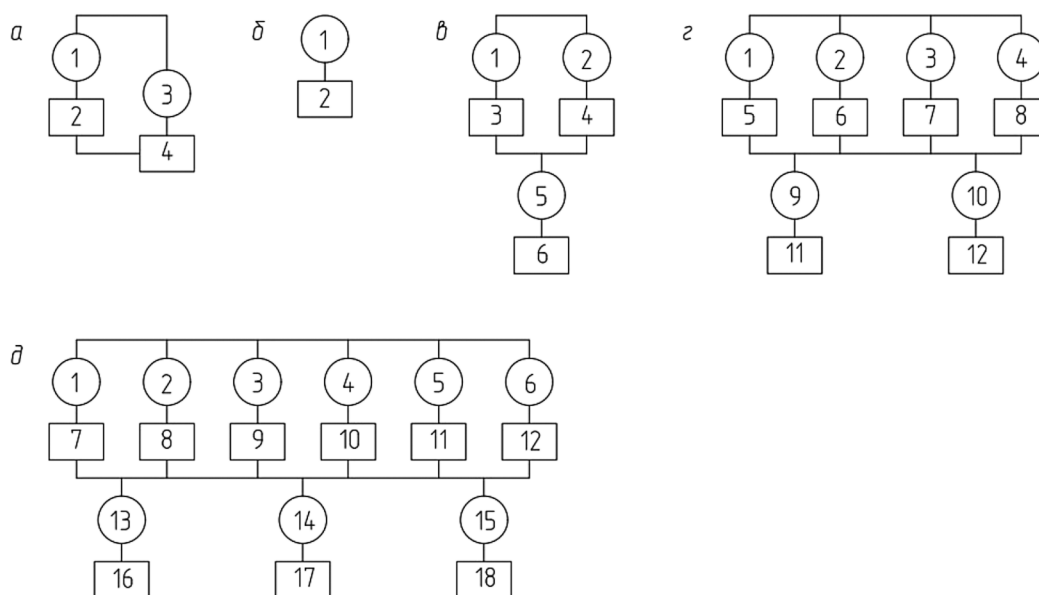


Рис. 1. Структурные модели строительного процесса разработки и транспортирования грунта скреперным комплектом, состоящим: а) из одного скрепера, одного бульдозера, где 1, 3 — машинисты, 2, 4 — скрепер и бульдозер соответственно; б) из одного скрепера без бульдозера, где 1 — машинист, 2 — скрепер; в) из двух скреперов, одного бульдозера, где 1, 2, 5 — машинисты, 3, 4 — скрепер, 6 — бульдозер; г) из четырех скреперов, двух бульдозеров, где 1, 2, 3, 4, 9, 10 — машинисты, 5, 6, 7, 8 — скрепер, 11, 12 — бульдозер; д) из шести скреперов, трех бульдозеров, где 1–6, 13–15 — машинисты, 7–12 — скреперы, 16–18 — бульдозеры

ТАБЛИЦА 1. Производительность скреперных комплектов в долях условной единицы с учетом вероятности безотказной работы людей и техники

Структурная модель	Производительность с учетом вероятности безотказной работы техники в диапазоне 0,75–0,85					
	0,75	0,77	0,79	0,81	0,83	0,85
а	0,775	0,785	0,795	0,806	0,816	0,828
б	0,769	0,781	0,794	0,806	0,819	0,833
в	0,811	0,817	0,825	0,833	0,841	0,850
г	0,874	0,877	0,880	0,884	0,888	0,893
д	0,903	0,905	0,907	0,909	0,911	0,914

Для того чтобы в полной мере оценить влияние надежности элементов, участвующих в строительных процессах, на их производительность, на основе полученных результатов построим графические зависимости (рис. 2).

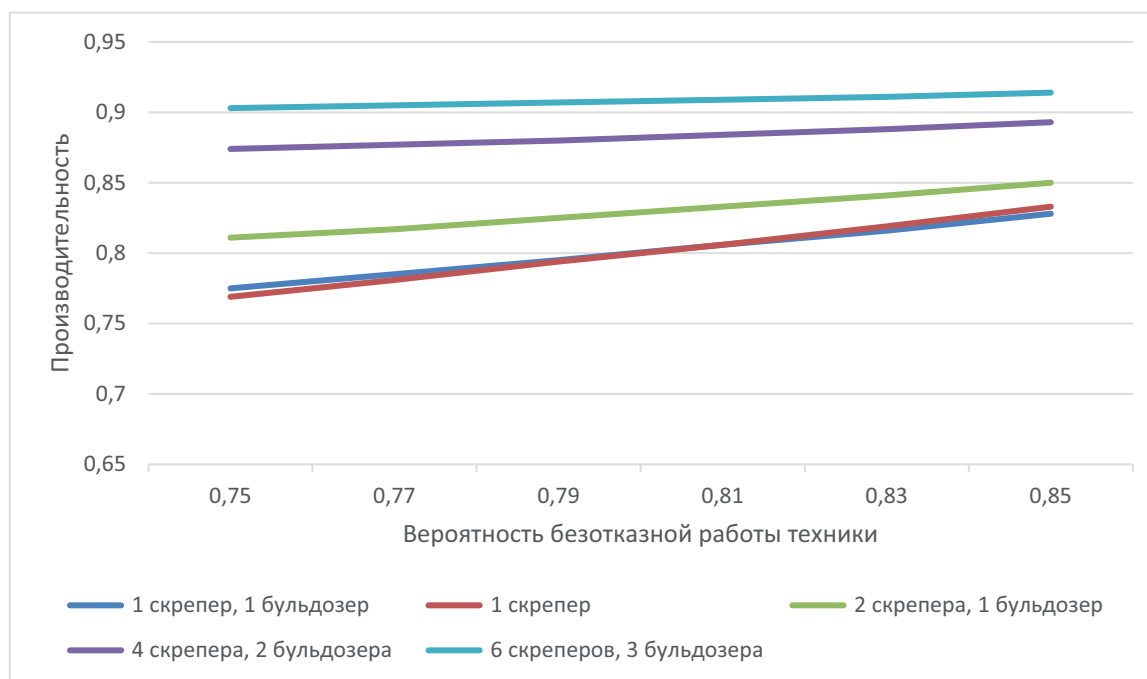


Рис. 2. Графические зависимости производительности комплектов землеройно-транспортной техники в долях условной единицы от надежности элементов, участвующих в производственном процессе

При анализе полученных графических зависимостей следует отметить: чем больше однотипных машин использовано в комплекте, тем меньшее влияние на производительность оказывает изменение надежности элементов, участвующих в строительном процессе [4]. Так, при работе комплекта, состоящего из 6 скреперов и 3 бульдозеров, изменение вероятности безотказной работы техники с 0,75 до 0,85 дает увеличение производительности всего на 1,2 %. В то время как при работе 2 скреперов и 1 бульдозера увеличение производительности в аналогичном случае будет 6,4 %.

Получается, чем больше параллельно связанных между собой элементов используется в строительном процессе, тем меньше надежность этих элементов влияет на производительность процесса [5].

Кроме того, если обратить внимание на две нижние кривые (рис. 1), которые иллюстрируют производительности комплектов, состоящих из 1 скрепера, 1 бульдозера и отдельно работающего скрепера, то можно заметить, что при вероятности безотказной работы техники 0,75–0,81 более производительным окажется комплект, состоящий из 1 скрепера и 1 бульдозера. При вероятностях безотказной работы техники 0,81–0,85 более производительным будет отдельно работающий скрепер, а при вероятности безотказной работы техники 0,81 производительности обоих комплектов одинаковы.

Оценив влияние надежности элементов строительного процесса на производительность землеройно-транспортных комплектов в общем виде, произведем

расчеты и получим результаты влияния надежности на конкретных примерах [6]. Для этого определим производительность одного (каждого) скрепера из вышеописанных комплектов землеройно-транспортной техники с учетом надежности (при средней величине вероятности безотказной работы техники 0,81) для марок машин, востребованных российскими строительными кампаниями. Например, для самоходных скреперов Komatsu WS16 с емкостью ковша $q = 11 \text{ м}^3$, работающих в комплекте с бульдозерами Komatsu D65EX16 для дальности возки грунта $L = 0,5\text{--}2,0 \text{ км}$. Результаты расчета представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Производительность одного (каждого) скрепера Komatsu WS16 с емкостью ковша $q = 11 \text{ м}^3$ в комплекте с учетом средней величины вероятности безотказной работы техники 0,81

Структурная модель	Расстояние дальности возки грунта, км							
	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	2,0
а	339,3	259,2	209,4	175,7	151,3	139,9	118,4	101,8
в	351,3	267,8	216,4	181,5	156,4	137,3	122,4	105,2
г	372,8	284,2	229,7	192,7	165,9	145,7	129,9	111,7
д	383,4	292,3	236,1	198,1	170,6	149,8	133,6	114,9

Структурная модель «б» в расчете не принимала участие, так как при средней величине вероятности безотказной работы техники 0,81 модели «а» и «б» показали равную производительность.

На основании результатов табл. 2 строим графические зависимости производительности одного (каждого) скрепера в комплекте от расстояния дальности возки грунта с учетом средней величины вероятности безотказной работы техники 0,81.

Проанализируем полученные результаты. Во-первых, с увеличением расстояния дальности возки грунта наблюдается резкое снижение производительности скрепера [7]. Это связано с увеличением времени цикла работы машины и потерями грунта при ее движении [8]. Во-вторых, можно отметить, что производительность одной и той же машины, работающей в комплектах, включающих в себя разное количество скреперов и бульдозеров, будет неодинаковой даже при том условии, что вероятность безотказной работы техники и людей, задействованных в работе этих комплектов, имеет одни и те же значения [9].

Например, при расстоянии дальности возки грунта 0,5 км производительность скрепера, работающего в комплекте из 6 скреперов и 3 бульдозеров, будет на 11,5 % выше производительности того же самого скрепера, но работающего в комплекте, состоящем из 1 скрепера и 1 бульдозера. Причем с увеличением

дальности возки грунта сама производительность, как было указано выше, снижается, а показатели производительности на одну (каждую) машину в комплекте остаются примерно одинаковыми. При расстоянии дальности возки грунта 2 км производительность скрепера, работающего в комплекте из 6 скреперов и 3 бульдозеров, выше производительности того же самого скрепера, но работающего в комплекте из 1 скрепера и 1 бульдозера, на 11,4 %. Таким образом, получается, что увеличение количества одноименных машин, параллельно работающих в комплекте, повышает производительность не только самого комплекта в целом, что очевидно, но и производительность каждой отдельной машины этого комплекта за счет повышения надежности работы комплекта путем резервирования машин [10].

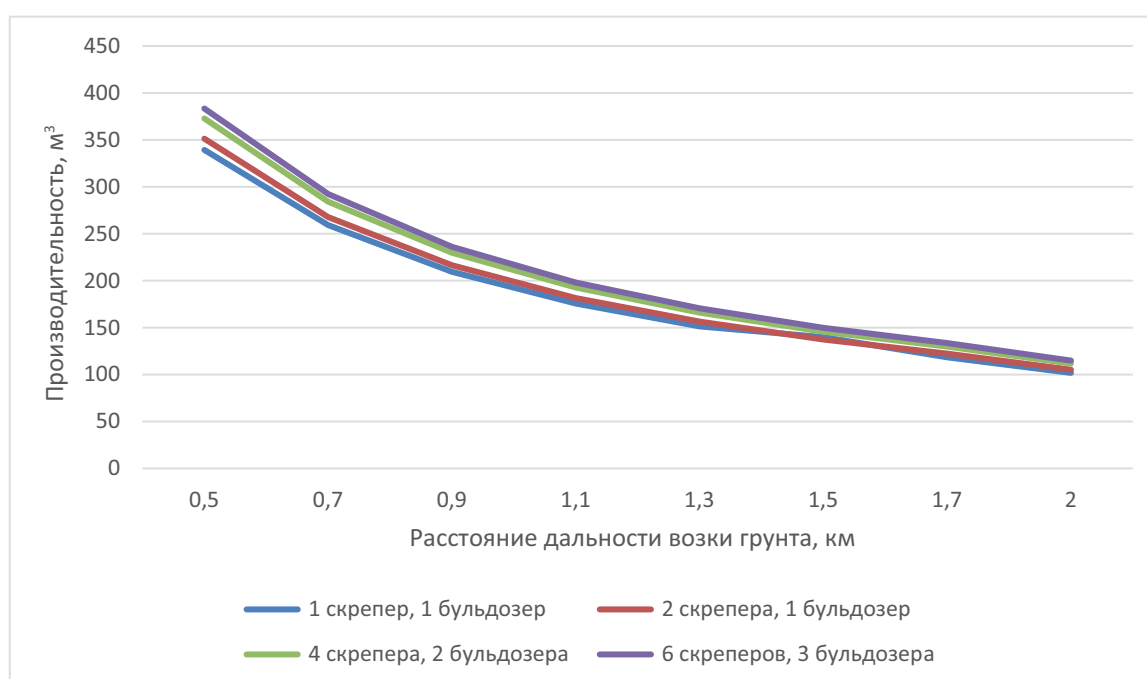


Рис. 3. Производительность одного (каждого) скрепера Komatsu WS16 с емкостью ковша $q = 11$ м³ в комплекте с учетом средней величины вероятности безотказной работы техники 0,81 для дальности возки грунта $L = 0,5–2,0$ км

Воспользовавшись графическими зависимостями (рис. 3), руководители строительных организаций могут легко и наглядно определить, каким комплектом землеройно-транспортной техники следует воспользоваться при определенных расстояниях дальности возки, какой производительностью при этом будет обладать каждая из ведущих машин при усредненных показателях вероятности безотказной работы техники, и, следовательно, понимать, каким комплектом техники лучше воспользоваться для качественного выполнения работ в установленные заказчиком сроки.

Список источников

1. Гусаков А. А., Гинзбург А. В., Веремеенко С. А. Организационно-технологическая надежность строительства. М.: Внешторгиздат, 1994. 472 с.
2. Гусаков А. А., Монфред Ю. Б., Прыкин Б. В. Моделирование организационно-технологической надежности строительства. М.: SVR-Аргус, 1994. 472 с.
3. Половко А. М., Гуров С. В. Основы теории надежности. СПб.: БХВ-Петербург, 2008. 704 с.
4. Лебедев В. М. Системотехника поточных методов строительства: монография. Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2006. 208 с.
5. Спиридонов Э. С., Максимов А. В. Научные основы оптимизации организации и управления комплексом работ по переустройству транспортных объектов. М.: Известия, 1998. 290 с.
6. Информационные модели функциональных систем / под ред. К. В. Судакова и А. А. Гусакова. М.: Фонд «Новое тысячелетие», 2004. 304 с.
7. Лебедев В. М. Системотехника строительного производства на возведении жилых комплексов // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2007. № 4. С. 28.
8. Панченко Н. М., Басовский Д. А. К вопросу выбора наиболее рационального сочетания землеройной и транспортной техники при производстве земляных работ // Бюллетень результатов научных исследований. 2023. № 1. С. 19–25.
9. Панченко Н. М. Выбор рационального сочетания землеройной и транспортной техники при производстве земляных работ // Тенденции развития науки и образования. 2022. № 87. Ч. 3. С. 70–74.
10. Панченко Н. М., Басовский Д. А. Влияние надежности элементов строительного процесса на сроки строительства // Бюллетень результатов научных исследований. 2025. № 3. С. 167–175.

Дата поступления: 25.06.2026

Решение о публикации: 08.07.2026

Контактная информация:

ПАНЧЕНКО Наталия Михайловна — кандидат техн. наук, доцент; panchnat@rambler.ru

БАСОВСКИЙ Дмитрий Аркадьевич — кандидат техн. наук, доцент; basovskiy76@mail.ru

Evaluation of the Influence of Reliability of Construction Process Elements on the Performance of the Leading Machine in Earthmoving and Transport Equipment Sets

N. M. Panchenko, D. A. Basovskiy

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Panchenko N. M., Basovskiy D. A. Evaluation of the Influence of Reliability of Construction Process Elements on the Performance of the Leading Machine in Earthmoving and Transport Equipment Sets // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 3, pp. 206–214. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-206-214 (In Russian)*

Abstract

Objective: to identify the impact of construction process component reliability on the performance of the lead machine in earthmoving equipment sets. Using the most popular and modern construction machine models as examples, to qualitatively and quantitatively evaluate the impact of reliability on their performance. **Methods:** each construction process is examined and evaluated from the perspective of large-scale systems theory. For ease of calculation, all technological processes under study are presented as structural models. Academician A. N. Kolmogorov's method for solving large-scale systems is used as the mathematical framework. **Results:** structural models of technological processes for the development and transportation of soil by earthmoving and transport vehicles are constructed. Based on structural models, the calculation of the performance of the considered sets of equipment is carried out, taking into account reliability. Based on the calculation results, graphical dependencies are constructed that clearly show the nature of the reliability effect on the performance of equipment sets. The performance is calculated taking into account the reliability for the scraper of the brand most in demand among builders, working in kits, for a range of range from 0.5 km to 2 km. **Practical significance:** the results of the study can be useful to the heads of transport construction organizations for the competent selection of sets of earthmoving and transport equipment, for understanding the possible performance of the leading machine in the set, as well as the actual construction time.

Keywords: productivity, probability of uptime, structural model, reliability, technological process, scraper, bulldozer

References

1. Gusakov A. A., Ginzburg A. V., Veremeenko S. A. Organizatsionno-tekhnologicheskaya nadezhnost' stroitel'stva [Organizational and Technological Reliability of Construction], Moscow, Vneshtorgizdat [Foreign Trade Publishing House], 1994, 472 p. (In Russian)
2. Gusakov A. A., Monfred Yu. B., Prykin B. V. Modelirovanie organizatsionno-tekhnologicheskoy nadezhnosti stroitel'stva [Modeling Organizational and Technological Reliability of Construction], Moscow: SVR-Argus, 1994, 472 p. (In Russian)
3. Polovko A. M., Gurov S. V. Osnovy teorii nadezhnosti [Fundamentals of Reliability Theory], Saint Petersburg: BKhV-Peterburg [BHV-Petersburg], 2008, 704 p. (In Russian)
4. Lebedev V. M. Sistemotekhnika potochnykh metodov stroitel'stva: monografiya [System Engineering of Flow Construction Methods: A Monograph], Belgorod, izd-vo BG TU im. V. G. Shukhova [Publishing House of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov], 2006, 208 p. (In Russian)

5. 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 Work Complexes for the Reconstruction of Transport Facilities], Moscow, Izvestiya [Izvestia], 1998, 290 p. (In Russian)
6. Informatsionnye modeli funktsional'nykh sistem [Information Models of Functional Systems], edited by K. V. Sudakov and A. A. Gusakov, Moscow, Fond "Novoe tysyacheletie" [Foundation "New Millennium"], 2004, 304 p. (In Russian)
7. Lebedev V. M. Sistemotekhnika stroitel'nogo proizvodstva na vozvedenii zhilykh kompleksov [System Engineering of Construction Production in the Construction of Residential Complexes], *Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova* [Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov], Belgorod, 2007, no. 4, p. 28. (In Russian)
8. Panchenko N. M., Basovskiy D. A. K voprosu vybora naibolee ratsional'nogo sochetaniya zemleroy noy i transportnoy tekhniki pri proizvodstve zemlyanykh rabot [On the Issue of Selecting the Most Rational Combination of Earthmoving and Transport Equipment for Earthworks], *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of Scientific Research Results], 2023, no. 1, pp. 19–25. (In Russian)
9. Panchenko N. M. Vyb or ratsional'nogo sochetaniya zemleroy noy i transportnoy tekhniki pri proizvodstve zemlyanykh rabot [Selecting a Rational Combination of Earthmoving and Transport Equipment for Earthworks], *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya* [Trends in the Development of Science and Education], 2022, no. 87, part 3, pp. 70–74. (In Russian)
10. Panchenko N. M., Basovskiy D. A. Vliyanie nadezhnosti elementov stroitel'nogo protsessa na sroki stroitel'stva [The Influence of the Reliability of Construction Process Elements on Construction Timelines], *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of Scientific Research Results], 2025, no. 3, pp. 167–175. (In Russian)

Received: June 25, 2026

Accepted: July 08, 2026

Author's information:

Nataliya M. PANCHENKO — PhD in Engineering, Associate Professor; panchnat@rambler.ru

Dmitrij A. BASOVSKIY — PhD in Engineering, Associate Professor; basovskiy76@mail.ru

УДК 621.865

Обзор средств роботизации складских терминалов

Е. В. Опарина

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

Для цитирования: Опарина Е. В. Обзор средств роботизации складских терминалов // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 3. С. 215–225. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-215-225

Аннотация

Цель: обзор современных средств роботизации складских терминалов, выделение ключевых тенденций развития и особенностей внедрения, применение современных возможностей САЕ — программ для моделирования движения роботизированной техники. **Методы:** выполнен обзор роботизированной техники, применяемой на складских терминалах, приведена классификация средств роботизации по способу передвижения, особенностям доставки и хранения грузов. Приведены результаты имитационного моделирования передвижения беспилотных вилочных погрузчиков в условиях склада. **Результаты:** моделирование динамической маршрутизации движения погрузчиков на основании показаний лазерного дальномера. **Практическая значимость:** исследованы возможности программного пакета Matlab для решения задачи планирования и валидации маршрута посредством использования гибридного алгоритма со встроенной процедурой по поиску кратчайшего пути по методу Ридса — Шеппа, а также для решения задач динамической маршрутизации робота на основании данных лазерного дальномера.

Ключевые слова: средства роботизации складов, беспилотный погрузчик, шаттловые системы, динамическая маршрутизация, лазерный дальномер

Введение

Тенденции в организации работы складских терминалов направлены на расширение автоматизации основных производственных процессов и интеграцию роботов в них. При этом, как известно, интегрирование роботизированных систем легче осуществлять в детерминированных системах, то есть в системах с четко структурированными условиями работы и решаемыми задачами. Складские терминалы относятся именно к таким системам.

Анализ тенденций в автоматизации и роботизации складских терминалов позволяет определить следующие ключевые цели:

- повышение плотности хранения грузов;
- увеличение высотности складов;
- увеличение скорости обработки задач по транспортировке грузов;
- полная автоматизация процесса приемки, разгрузки и размещения грузов, уменьшение роли человека-оператора в регулярных операциях с грузами;
- расширение возможностей работы в низкотемпературных складах, а также в среде с пониженным содержанием кислорода для складов с пожароопасными и взрывоопасными грузами [1–3].

Для работы на складах применяются следующие виды роботов:

1. Мобильные и стационарные роботы для горизонтального перемещения коробов и палет.

К ним относятся:

- стационарные роботы-манипуляторы;
- мобильные роботы AMR (Autonomous Mobile Robot) и LMR (Latent Mobile Robot);
- сервисные роботы (роботы-комплектовщики CTU (Carton Transfer Unit), коботы и др.).

2. Мобильные и передвигающиеся по специальным направляющим грузоподъемные роботы для вертикального и горизонтального перемещения грузов.

К ним относятся:

- мобильные автономные беспилотные погрузчики различных конфигураций — FMR-роботы (Forklift Mobile Robot);
- роботизированные краны-штабелеры;
- шаттловые системы и др.

3. Роботы-сортировщики для сортировки заказов по направлениям, маршрутам и т. д. [4–7]

По принципу организации передвижения по складу роботы подразделяются:

- на мобильных роботов (роботы, передвигающиеся на колесах и омниколесах и др.);
- на роботов, передвигающихся по специальным направляющим, например по монорельсу. Монорельс может быть как подвесным, так и напольным.

Вместе с развитием и усовершенствованием мобильных роботов распространение и активное предложение на рынке автоматизированных и роботизированных складских систем имеют высокоскоростные сортировочные системы, палетные и коробочные конвейерные системы, системы по организации высотных самонесущих складов с шаттловыми и карусельными системами хранения и т. д.

Роботизация склада штучных грузов

Роботизация склада штучных грузов направлена на повышение следующих показателей работы склада:

- качество технологического процесса;
- гибкость технологического процесса;
- эффективность складской технологической инфраструктуры и др.

Существенное влияние на эффективность работы склада штучных грузов оказывает оптимизация внутрицеховой логистики. Внедрение во внутрицеховую логистическую систему роботизированной техники позволяет улучшить такие узкие места процесса, как:

- непроизводительные перемещения (поиск груза);
- ошибки комплектации;
- жесткая логика процесса и ограничения в масштабировании;
- как следствие, низкая конкурентоспособность и снижение удовлетворенности клиентов.

Однако для интеграции роботизированной техники в технологический процесс складского терминала следует учесть следующие ключевые аспекты:

- значительные вложения средств на программное и аппаратное обеспечение процесса;
- обучение персонала;
- поэтапное внедрение всех составляющих займет значительное время;
- подобное решение будет целесообразным для складских терминалов со средней и высокой интенсивностью работы, а также для предприятий, прогнозирующих в ближайшей перспективе масштабирование своей работы;
- вместе с тем следует учитывать киберриски, зависимость от электричества и интернета, а также наличия запасных частей.

Автоматизированная система управления складом включает в себя такие подсистемы, как система планирования ресурсов (Enterprise Resource Planning, ERP), система координации текущих задач (Warehouse Execution System, WES), система управления роботами (Robot Management System, RMS) (рис. 1) [8, 9].

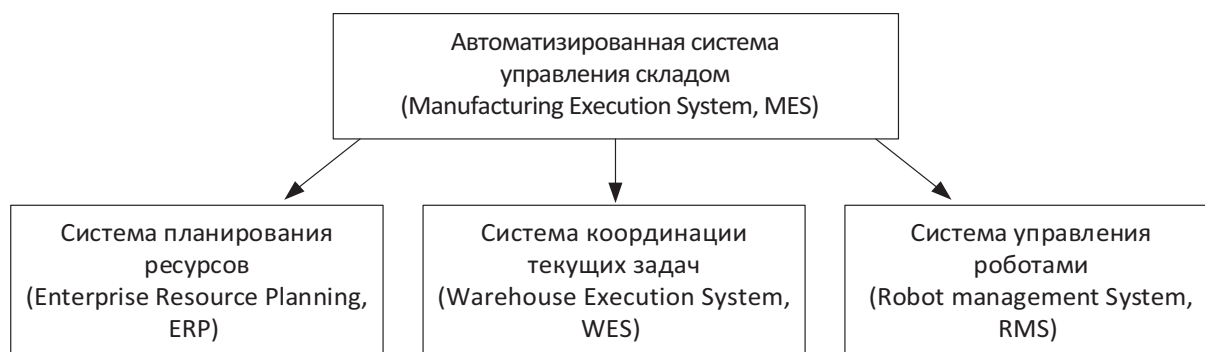


Рис. 1. Автоматизированная система управления складом

Мобильные роботы являются исполнительными устройствами в общей системе управления работой складского терминала. Функционал системы управления роботами (RMS) представлен на рис. 2. Информация о местоположении, уровне заряда, маршруте мобильного робота передается средствами телеметрии [7].

Для внедрения роботизированной техники в работу склада необходимо осуществить следующие технические подготовительные мероприятия:

- улучшенное покрытие зоны обслуживания роботами беспроводными сетями передачи данных (Wi-Fi, ZigBee, Bluetooth (в том числе широкополосный UWB), LoRa для территориально разнесенных объектов передачи данных);

- выравнивание и разметка напольного покрытия;
- нанесение лазерных отражателей на стены для возможности работы лазерных дальномеров;
- организация буферных зон и станций для зарядки аккумуляторных батарей;
- организация проходов и подготовка маршрутов;
- переход к организации адресного хранения и транспортирования грузов: нанесение специализированных меток на стеллажи и грузы, которые могут реализовываться на штрихкодах, QR-кодах или радиочастотных идентификаторах (RFID-технология) и т. д. [6–9].



Рис. 2. Система управления роботами

Имитационное моделирование динамической маршрутизации беспилотных вилочных погрузчиков в условиях склада

Локальная идентификация и позиционирование робота в помещении осуществляется с помощью встроенных средств активного наведения, таких как:

- магнитная, электромагнитная навигация, навигация по магнитным меткам — наиболее простая, доступная в реализации система навигации. Такой вид навигации встроен в легкие автономные тележечные роботы;
- лазерная, ультразвуковая навигация, ИК-навигация относится к более совершенным и точным способам навигации. Принцип действия основан на расчете расстояния до препятствия по времени прохождения отраженной волны. Такой вид навигации используется в беспилотных роботах-форклифтерах, роботах-ричтраках и др.;

- инерциальная навигация (IMU, Inertial Measurement Unit) основана на использовании данных с гироскопов, акселерометров. Используется совместно с одометрией, получаемой со стереоскопических камер. Активно применяется в роботах-палетировщиках;
- гибридная навигация (одновременное сочетание лазерной, инерциальной навигации и стереокамер). Наиболее часто встречающаяся практика в современных мобильных роботах;
- активно внедряются системы машинного зрения, визуальная одометрия, система позиционирования внутри помещений на основе UWB-технологии, акустические/ультразвуковые системы и др. [6].

В среде Matlab написана программа, реализующая выполнение задания по перевозке грузов на указанные стеллажи для двух беспилотных погрузчиков (табл. 1, 2). Навигация роботов реализована посредством данных от лазерного дальномера.

В программе прописан условный план склада со стеллажами `binaryOccupancyMap` (матрица 100 на 80 ячеек) и указаны адреса ячеек, в которые необходимо поставить грузы (рис. 3, а). Геометрическая проверка занятости маршрута осуществляется при помощи функции `validatorOccupancyMap` и `inflateMap`, чтобы погрузчик объезжал препятствия на некотором расстоянии (рис. 3, б). Алгоритм `plannerHybridAStar` использован для построения плавного маршрута движения, приближенного к движению реального транспортного средства с возможностью варьирования радиуса поворота. Нахождение кратчайшего пути при возможности погрузчика двигаться вперед и назад реализовано с помощью метода кривых Ридса — Шеппа (`rsConn = reedsSheppConnection('MinTurningRadius', 2)`) [8, 9].

ТАБЛИЦА 1. Фрагмент программной реализации

Действие	Программная реализация (фрагменты скрипта)
Создание карты для первого погрузчика	<code>robot1.estMap = occupancyMap(occupancyMatrix(map));</code> <code>robot1.inflateMap = occupancyMap(robot1.estMap);</code>
Указание места транспортировки груза для первого погрузчика	<code>packagePickup1 = [40 37 -pi/3];</code>
Проверка свободности и планирование траектории для первого погрузчика с использованием гибридного алгоритма	<code>vMap1 = validatorOccupancyMap;</code> <code>vMap1.Map = robot1.inflateMap;</code> <code>vMap1.ValidationDistance = 0.1;</code> <code>robot1.planner = plannerHybridAStar(vMap1, 'MinTurningRadius', 5);</code>
Нахождение кратчайшего пути передвижения на основании математической метода кривых Ридса — Шеппа	<code>rsConn = reedsSheppConnection('MinTurningRadius', 2);</code>

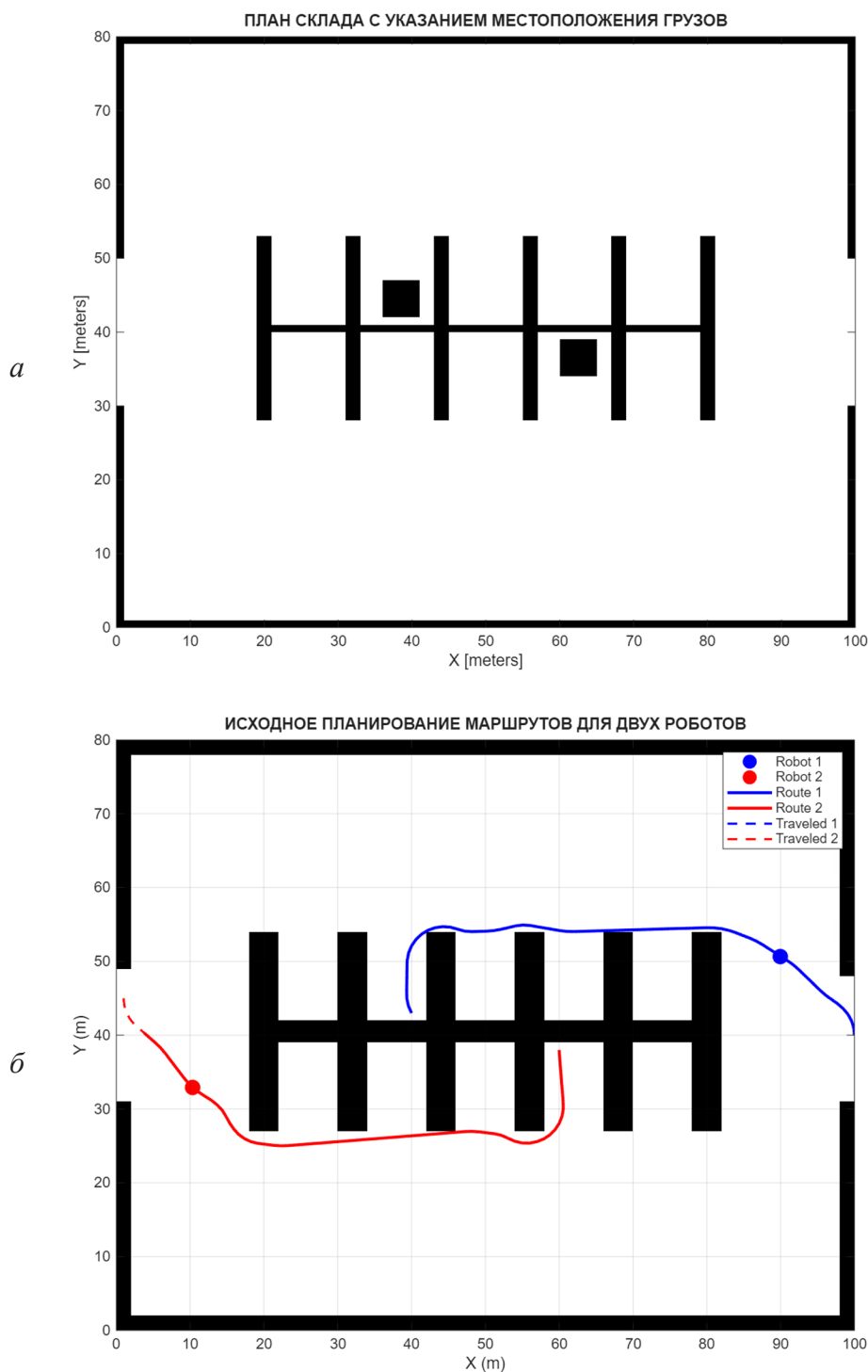


Рис. 3. *а* — план склада с визуализацией мест установки груза, *б* — исходные маршруты для беспилотных вилочных погрузчиков

В программе реализованы препятствия на планируемых маршрутах погрузчиков (рис. 4).

Определение расстояний до препятствий (имитация использования лазерного дальномера) реализовано посредством процедуры `robot.rangefinder = rangeSensor('HorizontalAngle', pi/3)` с задаваемым горизонтальным углом

сканирования поверхности в радианах. Процедура проверки занятости маршрута осуществляется в цикловом режиме с постоянным обновлением карты. В итоге маршрут перестраивается в реальном времени при выявлении помех движению на основании показаний лазерного дальномера (рис. 5, а, б)

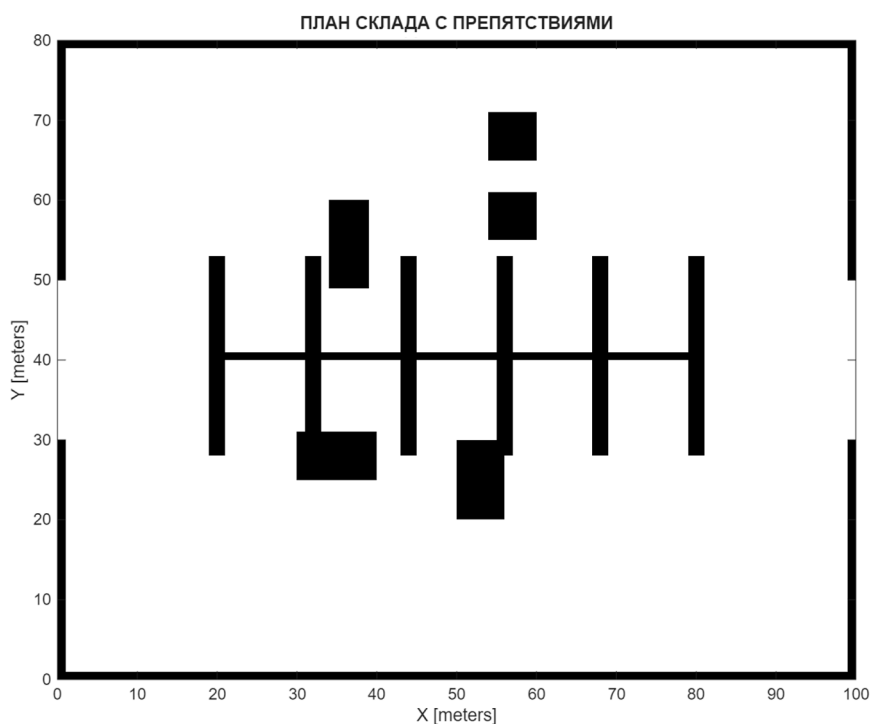


Рис. 4. План помещения склада с препятствиями, расположенными на предполагаемых траекториях беспилотных вилочных погрузчиков

ТАБЛИЦА 2. Фрагмент программной реализации (продолжение)

Действие	Программная реализация (фрагменты скрипта)
Моделирование датчика расстояния (лазерного дальномера) для первого робота	<code>robot1.rangefinder = rangeSensor('HorizontalAngle', pi/3);</code>
Обновление данных о местоположении на основе показаний лазерного сканирования	<code>if idx1 <= size(robot1.poses, 1) [ranges1, angles1] = robot1.rangefinder(robot1.poses(idx1,:), map); insertRay(robot1.estMap, robot1.poses(idx1,:), ranges1, angles1, robot1.rangefinder.Range(end));</code>
Перестройка карты планирования	<code>setOccupancy(robot1.inflateMap, getOccupancy(robot1.estMap)); inflate(robot1.inflateMap, 1, 'grid');</code>
Перерасчет траектории погрузчика (динамическая маршрутизация)	<code>startPoses1 = robot1.route(1: end-1,:); endPoses1 = robot1.route(2: end,:); robot1.pathSegs = connect(rsConn, startPoses1, endPoses1); robot1.poses = [];</code>
Движение погрузчика к следующей точке, если маршрут свободен	<code>idx1 = idx1 + 1;</code>

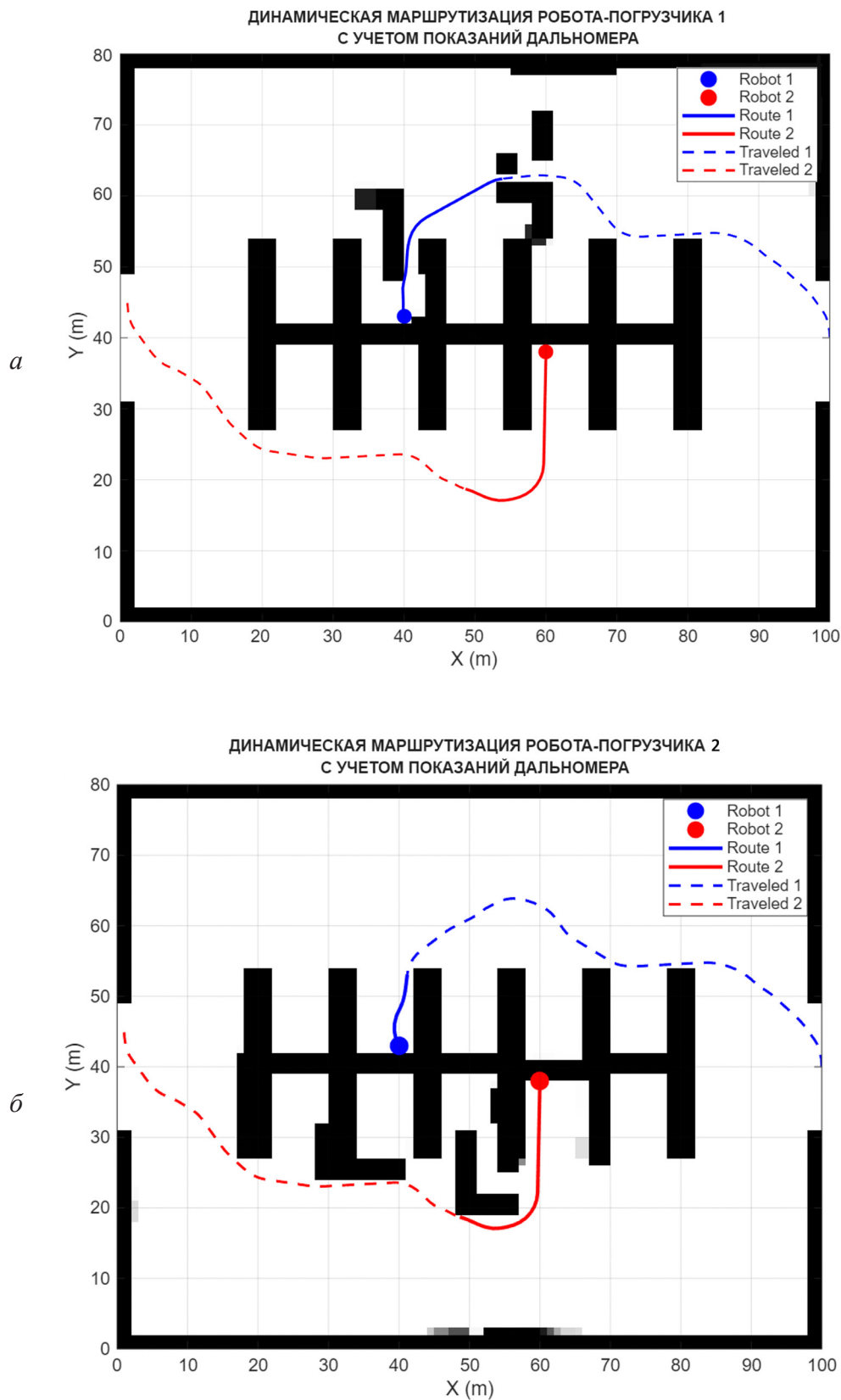


Рис. 5. Динамическая маршрутизация *a* — первого и *б* — второго беспилотного вилочного погрузчика на основании данных лазерного сканирования

Выводы

1. В статье представлены результаты анализа технологического развития складских терминалов. Ключевыми целями автоматизации и роботизации складов являются повышение плотности хранения грузов, увеличение высотности складов, увеличение скорости обработки задач по транспортировке грузов, полная автоматизация технологического процесса и уменьшение роли человека-оператора в операциях с грузами.

2. Проведен обзор применяемых на складских терминалах мобильных и стационарных роботов, используемых для задач горизонтального, вертикального перемещения грузов и их сортировки. Отмечено распространение и активное предложение на рынке автоматизированных и роботизированных складских систем высокоскоростных сортировочных конвейерных, лифтовых и карусельных способов хранения грузов, систем по организации высотных самонесущих складов с шаттловыми способами доставки груза на стеллажи и др.

3. Приведена система автоматического управления работой склада. Приведен основной функционал системы управления роботами. Выделены ключевые стороны процесса интеграции роботизированной техники в работу склада.

4. В среде имитационного моделирования Matlab написана программа, реализующая перемещение беспилотных погрузчиков в условиях помещения склада. Программа реализует задачу планирования и валидации пути с помощью гибридного алгоритма со встроенной процедурой нахождения кратчайшего пути по методу кривых Ридса — Шеппа, а также осуществляет динамическую маршрутизацию погрузчиков и составляет карту занятости склада на основании показаний лазерных дальномеров.

Список источников

1. Умнов В. П., Кобзев А. А. Промышленные роботы и мехатронные системы: монтаж, наладка, испытания и обслуживание: учебное пособие / Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2021. 304 с.

2. Шахворостов С. А. Роботы в системах автоматизации: учебное пособие. Красноярск: Научно-инновационный центр, 2016. 110 с. DOI: 10.12731/asu.madi.ru/RSA.2016.110

3. Симонов С. А. Роботизированные транспортно-накопительные системы для внутрицеховой логистики // Склад и техника. 2020. № 9. С. 20–23.

4. Титенок А. В. Основы робототехники: учеб. пособие. Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. 236 с.

5. Смирнов А. Б., Тимофеев А. Н. Промышленные и сервисные роботы: учеб. пособие. СПб., 2019. 139 с.

6. Смирнов Ю. А., Детистов В. А. Датчики и системы позиционирования мобильных роботов и автономных транспортных средств: учеб. пособие для вузов. СПб.: Лань, 2026. 272 с.

7. RMS-система: мозг роботизированного склада и производства // НИССА Инжиниринг. URL: <https://nissa-eng.ru/stati/rms-sistema-mozg-robotizirovannogo-sklada-i-proizvodstva> (дата обращения: 26.06.2026).

8. Corke P. Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms. Springer, 2017. 693 p.

9. Robotics, Modelling, Planning and Control / B. Siciliano [et al.]. Springer, 2010. 632 p.

Дата поступления: 22.05.2026

Решение о публикации: 08.07.2026

Контактная информация:

ОПАРИНА Екатерина Владимировна — кандидат техн. наук, доцент кафедры «Механика и прочность материалов и конструкций», доцент кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы»; oparina-ekaterina@inbox.ru

Overview of Warehouse Terminal Roboticization Tools

E. V. Oparina

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Oparina E. V. Overview of Warehouse Terminal Roboticization Tools // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 3, pp. 215–225. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-215-225. (In Russian)*

Abstract

Objective: review of modern means of robotization of warehouse terminals, highlighting key trends in development and implementation features, application of modern capabilities of CAE — programs for modeling the movement of robotic equipment. **Methods:** an overview of robotic equipment used in warehouse terminals is carried out, the classification of robotization means is given by the mode of movement, features of delivery and storage of goods. The results of simulation modeling of the movement of unmanned forklifts in warehouse conditions are given. **Results:** modeling of dynamic routing of the movement of forklifts based on the readings of a laser rangefinder are presented. **Practical significance:** the capabilities of the Matlab software package have been investigated for solving the problem of route planning and validation using a hybrid algorithm with a built-in shortest path search procedure using the Reeds — Shepp method, as well as for solving problems.

Keywords: robot, gripper, kinematic analysis, dynamic analysis, force transmission ratio, kinematic transmission ratio

References

1. Umnov V.P., Kobzev A.A. Promyshlennyye roboty i mekhatronnyye sistemy: montazh, naladka, ispytaniya i obsluzhivanie: uchebnoye posobie [Industrial Robots and Mechatronic Systems: Installation, Commissioning, Testing and Maintenance: A Textbook], Vladimirskiy gosudarstvennyy universitet im. A. G. i N. G. Stoletovkh [Vladimir State University named after A. G. and

N. G. Stoletovs]. Vladimir, izd-vo VIGU [Vladimir State University Publishing House], 2021, 304 p. (In Russian)

2. Shakhvorostov S.A. Roboty v sistemakh avtomatizatsii: uchebnoe posobie [Robots in automation systems: A Textbook], Krasnoyarsk, Nauchno-innovatsionnyj tsentr [Scientific and Innovation Center], 2016, 110 p. DOI: 10.12731/asu.madi.ru/RSA.2016.110 (In Russian)

3. Simonov S.A. Robotizirovannye transportno–nakopitelnye sistemy dlya vnutritsekhovoj logistiki [Robotic Transport and Storage Systems for Intrashop Logistics], *Sklad i tekhnika [Warehouse and Equipment]*, 2020, no. 9, pp. 20–23. (In Russian)

4. Titenok A.V. Osnovy robototekhniki: uchebnoe posobie [Fundamentals of Robotics: A Textbook], Vologda, Infra-Inzheneriya [Infra-Engineering], 2022, 236 p. (In Russian)

5. Smirnov A.B., Timofeev A.N. Promyshlennye i servisnye roboty: uchebnoe posobie [Industrial and Service Robots: A Textbook], St. Petersburg, 2019, 139 p. (In Russian)

6. Smirnov Yu.A., Detistov V. A. Datchiki i sistemy pozitsionirovaniya mobilnykh robotov i avtonomnykh transportnykh sredstv: uchebnoe posobie dlya vuzov [Sensors and Positioning Systems for Mobile Robots and Autonomous Vehicles: A Textbook for universities], St. Petersburg, Lan' [Lan Publishing House], 2026, 272 p. (In Russian)

7. RMS-sistema: mozg robotizirovannogo sklada i proizvodstva [RMS System: The Brain of a Robotic Warehouse and Production], NISSA Inzhiniring: ofitsial'nyj sajt [NYSSA Engineering: official website]. URL: <https://nissa-eng.ru/stati/rms-sistema-mozg-robotizirovannogo-sklada-i-proizvodstva> (accessed: June 26, 2026). (In Russian)

8. Corke P. Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms, Springer, 2017, 693 p.

9. Siciliano B., et al. Robotics, Modelling, Planning and Control, Springer, 2010, 632 p.

Received: May 22, 2026

Accepted: July 08, 2026

Author's information:

Ekaterina V. OPARINA — PhD in Engineering, Associate Professor of the “Mechanics and Strength of Materials and Structures” Department, Associate Professor of the “Ground Transport and Technological Complexes” Department; oparina-ekaterina@inbox.ru

УДК 004.8:006.354

Разработка требований к стандартам в области этики искусственного интеллекта

А. Н. Федорова, Л. Ф. Казанская

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

Для цитирования: Федорова А. Н., Казанская Л. Ф. Разработка требований к стандартам в области этики искусственного интеллекта // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 3. С. 226–236. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-226-236

Аннотация

Исследование посвящено вопросу создания безопасных и надежных систем искусственного интеллекта (ИИ). **Цель:** создание четкого перечня требований для будущих стандартов в области этики искусственного интеллекта с целью преодоления разрыва между теорией и практикой. **Методы:** использованы методы индукции и синтеза, сравнительного анализа и аналогии. **Результаты:** проведен анализ существующего руководства по этике ИИ и сделан вывод, что оно содержит в основном общие рекомендации, без конкретных технических правил. Представлены возможные ошибки и причины сложности привлечения к ответственности сторон, потенциально причастных к внедрению ИИ. Разработан трехкомпонентный перечень требований, предъявляемых к технологиям искусственного интеллекта и соответствующим данным, на основе которых они определены; предложен поэтапный план интеграции этических принципов в практические аспекты разработки и регулирования. **Практическая значимость:** предложение основ для национальных и международных нормативных документов, которые обеспечат безопасное применение технологии и повысят доверие пользователей.

Ключевые слова: искусственный интеллект, стандартизация, этика ИИ, доверие к технологиям, этапы внедрения стандартов

Введение

Все человечество наблюдает, как искусственный интеллект все активнее внедряется в самые важные сферы жизни людей. Алгоритмы уже сегодня влияют на постановку диагнозов, управляют транспортом, принимают финансовые решения и формируют новостную ленту. Однако чем шире распространение технологии, тем острее становятся вопросы о ее надежности, безопасности и этичности [1, 2].

Мировое экспертное сообщество отреагировало на эти вызовы созданием множества этических хартий [3, 4]. Но их главный недостаток, как показывает анализ, — это обилие общих фраз при отсутствии практических инструментов. Такие понятия, как «честность» или «подотчетность», остаются благими пожеланиями, потому что не подкреплены конкретными техническими требованиями [5, 6].

Такой разрыв между словами и делом создает серьезные проблемы. Без четких и проверяемых критериев невозможно наладить эффективный контроль над сложными системами. Это порождает правовую неопределенность и, как следствие, недоверие со стороны как обычных людей, так и контролирующих органов [1, 7]. К данному вопросу обращались отечественные [1, 6, 7] и зарубежные исследователи [8, 9].

Материалы и методы

В подготовке материалов и результатов исследования использованы научные методы, в частности индукции (для выявления ошибок и причин, по которым привлечение к ответственности потенциально ответственных сторон в сфере внедрения ИИ затруднено), синтеза (в рамках подготовки трехкомпонентного перечня требований, предъявляемых к технологиям искусственного интеллекта), сравнительного анализа (в процессе проведения критического анализа существующего руководства по этике ИИ), аналогии (способствующей подготовке этапного плана интеграции этических принципов в практические аспекты разработки и регулирования).

Научная теория, на которую авторы опираются при обосновании (подтверждении) гипотезы о необходимости наличия в отраслях экономики перечня требований, предъявляемых к технологиям искусственного интеллекта и соответствующим большим данным, используемым при обучении искусственного интеллекта, а также этапного планирования интеграции требований к ИИ с практикой их разработки и эксплуатации, представлена в работах Х. С. Сайгитмагомедовой [1], В. В. Шляпникова [6], В. Н. Козловского, Д. И. Благовещенского, Д. И. Панюкова, Р. Р. Гафарова [7], A. Jobin M. Ienca, E. Vayena [8], L. Floridi [9], Б. В. Кисуленко [11].

Использованы отдельные стандартизированные и нормативно-методические документы, в частности документ стандарта ISO по определению достоверности технологий искусственного интеллекта [2], руководство Еврокомиссии по этике искусственного интеллекта [3], рекомендации ЮНЕСКО по этике искусственного интеллекта [4], принципы объяснимого искусственного интеллекта [5], инструктивные рекомендации для обнаружения и устранения алгоритмического смещения ИИ [10], рекомендации по формированию стандартизированной отчетности в разработках систем искусственного интеллекта [12].

Изучению теории и методологии подготовки стандартов и правовых механизмов для регулирования процессов разработки и эксплуатации отдельных цифровых технологий и систем, включая технологии ИИ, посвящены научные труды следующих авторов.

Исследованию правовых, нормативных вопросов регулирования искусственного интеллекта, внедрения отдельных правовых инициатив в этой области

посвящена работа Х. С. Сайгитмагомедовой [1]. Изучение эмпатии, в частности искусственной эмпатии, которая представляет собой способность искусственного интеллекта распознавать человеческие эмоции и соответствующим образом на них реагировать, уделено внимание в работе В. В. Шляпникова [6]. В. Н. Козловский, Д. И. Благовещенский, Д. И. Панюков, Р. Р. Гафаров [7] подробно анализируют проблемы неэффективного использования человеческого потенциала, низкой мотивации и недостаточного обучения персонала в процессах улучшения качества продукции в условиях цифровой трансформации. Важность интеграции усилий по разработке руководящих принципов с тщательным этическим анализом и адекватными стратегиями внедрения подчеркивается авторами A. Jobin, M. Ienca, E. Vayena [8]. Принципы, ограничители и возможности внедрения этично работающих технологий искусственного интеллекта раскрываются L. Floridi [9]. Б. В. Кисуленко [11] анализирует риски, которые могут привести к потере управляемости беспилотных и высокоавтоматизированных транспортных средств, рассматривает меры противодействия киберугрозам.

Авторы статьи дополняют и актуализируют ранее опубликованный ряд исследований в области регламентирующих принципов, процедур и механизмов стандартизации технологий искусственного интеллекта.

В исследовании поставлена цель создать четкий перечень требований для будущих стандартов в области этики искусственного интеллекта, способствующего преодолению разрыва между теорией искусственной интеллектуализации и практикой внедрения ИИ в отраслях и организациях.

Анализ ключевых проблем: от теории к практике

Проведенное исследование позволяет выделить три основных барьера на пути внедрения этики в практику ИИ.

1. Предвзятость алгоритмов и проблема справедливости.

Провозглашенный принцип справедливости требует от ИИ беспристрастности. Однако на деле модели, обучаемые на исторических данных, не просто копируют, но и усиливают заложенные в них социальные предрассудки. Яркий пример — система COMPAS, используемая в американских судах. Статистика показала, что алгоритм систематически завышал риски для афроамериканцев по сравнению с представителями других рас при схожих исходных данных. Этот случай доказывает: одного провозглашения принципа мало, нужны встроенные механизмы для выявления и устранения смещений на всех этапах жизни системы [10].

2. Кризис понимания: черный ящик нейросетей.

Идея прозрачности упирается в фундаментальное ограничение — огромную сложность современных моделей машинного обучения. Глубокие нейросети часто представляют собой черные ящики, чья внутренняя логика неясна даже для их создателей. Эта проблема становится критической в таких областях, как медицина,

где врач должен не просто принять решение ИИ, но и понять его обоснование. Отсутствие понятности блокирует доверие и создает правовые риски, делая почти невозможным установление причины ошибки [5].

3. Правовая неопределенность и вопрос ответственности.

Кто должен отвечать, если автономная система причинила вред? Действующие законы плохо приспособлены для ответа на этот вопрос. В длинной цепочке — от разработчика и поставщика данных до конечного оператора — очень сложно однозначно определить виновного [1, 6, 11]. Ситуацию ухудшает отсутствие единых правил документирования, что делает расследование инцидентов крайне сложным (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Распределение ответственности в мире ИИ

Потенциально ответственная сторона	Возможные ошибки	Причины сложности привлечения к ответственности
Разработчик	- создание несовершенной модели; - неточности в обучении системы; - непреднамеренное заложение предубеждений в алгоритм	- сложно доказать, что ошибка в коде напрямую привела к конкретному ущербу; - модель могла быть переобучена уже после разработки
Поставщик данных	- предоставление неполных или устаревших данных; - наличие в данных скрытых предвзятостей	- часто является сторонней организацией, не участвующей в эксплуатации системы; - затруднительно предъявить юридически обоснованные претензии
Оператор (пользователь)	- использование системы не в соответствии с инструкцией; - игнорирование явных предупреждений; - слепое доверие результатам алгоритма без проверки	может ссылаться на то, что действовал в соответствии с руководством для «автономного» ИИ и не обязан был вмешиваться в его работу
Владелец/регулятор	- отсутствие регулярного мониторинга системы; - отсутствие четкого регламента использования; - не обеспечена и не предусмотрена процедура обжалования решений ИИ	- ответственность слишком размыта; - непонятно, какое именно упущение привело к инциденту

Структура требований для стандартизации этического ИИ

Для решения этих проблем предлагается многоуровневая система требований, охватывающая данные, алгоритмы и результаты их работы. Каждый блок содержит проверяемые параметры, готовые для включения в нормативные документы.

1. Обеспечение справедливости и беспристрастности.

Проверяется отсутствие систематических ошибок в отношении уязвимых групп населения. Конкретные меры для стандартов:

- полная документация данных (обязательное ведение подробных паспортов наборов данных с указанием демографического состава, методов сбора, процедур очистки и происхождения информации) [12];
- регулярная проверка на смещения (обязательное тестирование на репрезентативных выборках до запуска системы и в процессе ее работы, установление четких численных показателей, например максимальный разрыв в точности между группами — 5 %);
- единые метрики (стандартизация использования таких измерителей, как демографический паритет, равенство возможностей и предсказательное равенство) [8].

2. Достижение прозрачности и объяснимости.

Проверяется способность заинтересованных сторон понять логику принятия решений. Конкретные меры для стандартов:

- многоуровневая система объяснений (введение градации уровней прозрачности в зависимости от важности применения ИИ и разработка удобных форматов отчетности для разных аудиторий) [5];
- паспорт модели (обязательное создание документа, описывающего ее структуру, данные обучения, показатели эффективности и известные ограничения) [11];
- требования к понятности (для систем с высоким уровнем риска — законодательное закрепление минимально необходимой степени понятности решений и стандартизация методов их объяснения).

3. Гарантии подотчетности и контроля.

Проверяется наличие работающих механизмов распределения ответственности и возможности независимой проверки. Конкретные меры для стандартов:

- неизменяемый журнал действий (обязательная запись всех важных решений системы с сохранением входных данных, параметров и версии модели);
- органы надзора (введение требований к созданию внутренних комитетов по этике ИИ в компаниях, работающих с критическими приложениями, и установление правил регулярной проверки);
- процедура обжалования (закрепление на уровне стандарта обязанности создавать простые и доступные механизмы для обжалования решений ИИ с четкими сроками их рассмотрения).

План внедрения стандартов

Этап 1. Создание базового документа — фундамента для всей системы [2, 4] (срок: первые 6–9 месяцев) — представлено в табл. 2.

Этап 2. Адаптация под конкретные отрасли [1] (срок: следующие 9–12 месяцев) представлена в табл. 3.

ТАБЛИЦА 2. Формирование концептуальной основы плана внедрения стандартов

Направление деятельности	Конкретные шаги	Ожидаемый результат
Формирование рабочей группы (форсайта, кросс-отраслевой сетевой площадки, функционирующей на основе электронных коммуникаций участников из различных отраслей, компаний)	Привлечение ИТ-специалистов, юристов, представителей регуляторных органов, научного сообщества и общественности	Создание междисциплинарной экспертной платформы
Разработка терминологического аппарата	Составление глоссария с определениями объяснимого ИИ, алгоритмической предвзятости и других ключевых понятий	Унификация понятийного аппарата для всех участников процесса
Создание рамочного документа	Формулировка базовых принципов: пропорциональности требований, сквозного документирования жизненного цикла ИИ	Разработка концептуальной основы для последующей детализации
Общественное обсуждение	Публикация черновой версии стандарта и сбор предложений от представителей бизнеса и экспертного сообщества	Выявление спорных моментов и достижение консенсусных решений

ТАБЛИЦА 3. Адаптация под конкретные отрасли

Приоритетная отрасль	Критические аспекты	Специфические требования
Здравоохранение	Диагностика, подбор терапии	Предоставление врачу списка ключевых факторов диагноза в порядке значимости на понятном языке
Транспортная сфера	Беспилотные системы, чат-боты, компьютерное зрение в обеспечении безопасности, предиктивная аналитика состояния инфраструктуры и транспорта	Требования к безопасности и протоколам принятия решений в критических ситуациях
Финансовый сектор	Кредитный рейтинг	Методики выявления и устранения дискриминационных практик при оценке заемщиков
Юриспруденция	Оценка судебных перспектив	Обеспечение прозрачности и обоснованности юридических прогнозов

Этап 3. Разработка алгоритма проверки, так как без этого стандарты просто рекомендация (срок: 1–1,5 года).

1. Формирование нормативно-методической базы.

Первоочередной задачей является разработка унифицированных методик тестирования. Для верификации корректности алгоритмов необходимо создание эталонных дата-сетов и утверждение статистических метрик. Примером такой метрики может служить допустимое отклонение в точности прогноза между различными демографическими группами, не превышающее установленного порога (например, 5 %).

2. Создание системы сертификации.

Требуется формирование института независимой аккредитации испытательных лабораторий, исключающего влияние разработчиков. Обязательный характер сертификации должен быть регламентирован для систем с высоким уровнем риска, тогда как для прочих может применяться добровольный порядок. Результаты сертификации подлежат внесению в публичный реестр для обеспечения прозрачности.

3. Подготовка профессиональных кадров.

Помимо общих мероприятий, предусмотренных федеральным проектом «Искусственный интеллект», и государственных мер, для осуществления контрольных функций необходима организация программ целевой подготовки и переподготовки, сертификации аудиторов в области искусственного интеллекта, что подразумевает формирование новой профессиональной квалификации на рынке труда.

Этап 4. Апробация и адаптация технологий и стандартов, компетенций, обученных созданию и эксплуатации технологий ИИ специалистов.

Данный этап является перманентным процессом и включает:

- проведение пилотных испытаний на базе компаний — лидеров в приоритетных отраслях для апробации стандартов в реальных условиях и выявления латентных недостатков;
- организацию каналов обратной связи от разработчиков и пользователей для мониторинга проблем применения нормативных требований;
- регулярный пересмотр и актуализацию стандартов с периодичностью 1–2 года для сохранения их релевантности в условиях быстро развивающихся технологий.

Этап 5. Гармонизация с международной практикой.

Параллельно осуществляется взаимодействие с мировым сообществом, включающее:

1. Изучение и анализ наилучших мировых и отечественных практик по стандартизации в области этических требований к ИИ (многие компании и профессиональные сообщества разрабатывают собственные кодексы. Например, в России в 2021 году крупные игроки («Сбер», «Яндекс», VK) подписали Кодекс этики

в сфере ИИ — он задает ориентиры: приоритет безопасности человека, недопущение дискриминации, ответственность).

2. Активное участие в работе международных организаций по стандартизации (ISO/IEC) с целью продвижения национальных наработок и обеспечения совместимости отечественных стандартов с мировыми. Это является ключевым условием для вывода российских технологий на глобальные рынки.

Таким образом, предложенный комплексный подход позволяет сформировать безопасную и регулируемую среду для развития технологий искусственного интеллекта. Его последовательная реализация является необходимым условием для эффективной и гармоничной интеграции ИИ в социально-экономическую систему.

Заключение

Результаты проведенного анализа свидетельствуют о том, что для успешного развития искусственного интеллекта необходим переход от общих формулировок к установлению конкретных технических нормативов. В рамках исследования были последовательно решены следующие задачи: осуществлена систематизация ключевых рисков, связанных с внедрением ИИ (предвзятость алгоритмов и проблема справедливости, беспристрастности; недостаточное понимание, неполная ясность искусственной основой машинного обучения сути конкретных ситуаций для принятия решений и черный ящик нейросетей; правовая неопределенность и вопрос определения ответственности за действия и потенциальные ошибки ИИ); разработана структурированная трехкомпонентная система требований, предъявляемых к исходным данным, алгоритмам обработки и конечным результатам их работы; сформулирован реализуемый поэтапный план интеграции этических принципов в практические аспекты разработки и регулирования.

Представленный комплексный подход рассматривается в качестве необходимого условия для формирования безопасной и управляемой экосистемы эволюции технологий искусственного интеллекта. В конечном итоге именно это позволяет обеспечить не просто функционирование ИИ, а его эффективную и сбалансированную интеграцию в социальные процессы и экономические системы.

Список источников

1. Сайгитмагомедова Х.С. Правовое регулирование систем искусственного интеллекта // Право. Юридические науки. 2024. № 1. С. 88–90.
2. Международная организация по стандартизации. ISO/IEC TR 24028:2020. Информационная технология. Искусственный интеллект. Обзор достоверности систем искусственного интеллекта. 2020. URL: <https://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=6528606&ysclid=mgs7q0hbf5842444073> (дата обращения: 12.06.2026).
3. Комиссия европейских сообществ. Руководство по этике искусственного интеллекта. 2024. URL: <https://www.coe.int/en/web/artificial-intelligence/cai> (дата обращения: 10.06.2026).

4. Рекомендации ЮНЕСКО по этике искусственного интеллекта. 2024. URL: <https://www.unesco.org/en/artificial-intelligence/recommendation-ethics> (дата обращения: 13.06.2026).
5. Принципы объяснимого искусственного интеллекта. 2020. URL: <https://d-russia.ru/v-ssha-sformulirovany-4-principa-objasnimogo-iskusstvennogo-intellekta.html?ysclid=mgs7oa9p-wj769887440> (дата обращения: 11.06.2026).
6. Шляпников В. В. Искусственный интеллект: эмпатия и подотчетность // Общество. Среда. Развитие. 2022. № 3 (64). С. 100–103. DOI: 10.53115/19975996_2022_03_100-103
7. Козловский В. Н., Благовещенский Д. И., Панюков Д. И., Гафаров Р. Р. Цифровизация и проблемы трудовых коллективов: роли и ответственность // Стандарты и качество. 2022. № 1. С. 94–98.
8. Jobin A., Ienca M., Vayena E. The Global Landscape of AI Ethics Guidelines // Nature Machine Intelligence. September 2019, no. 1 (2). DOI: 10.1038/s42256-019-0088-2
9. Floridi L. The Ethics of Artificial Intelligence: Principles, Challenges, and Opportunities // Oxford University Press, 2023. 243 p.
10. Обнаружение и устранение алгоритмического смещения. 2025. URL: <https://gimal-ai.ru/blog/obnaruzhenie-i-ustranenie-algoritmicheskogo-smescheniya/?ysclid=mgs7ld6188973197446> (дата обращения: 10.06.2026).
11. Кисуленко Б. В. Регламентация кибербезопасности автомобилей на основе рисков // Стандарты и качество. 2022. № 3. С. 104–107.
12. Стандартизированная отчетность в разработках систем искусственного интеллекта. 2024. URL: <https://webiomed.ru/blog/standartizovannaia-otchetnost-v-razrabotkakh-sistem-ii/?ysclid=mgs7w0usnc229703660> (дата обращения: 14.06.2025).

Дата поступления: 03.07.2026

Решение о публикации: 31.07.2026

Информация об авторах:

ФЕДОРОВА Анастасия Николаевна — магистрант; fedorovaAN2003@yandex.ru

КАЗАНСКАЯ Лилия Фаатовна — доктор техн. наук, профессор; yalifa@inbox.ru

Developing Requirements for Standards in the Field of Ethics of Artificial Intelligence

A. N. Fedorova, L. F. Kazanskaya

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

For citation: Fedorova A. N., Kazanskaya L. F. Developing Requirements for Standards in the Field of Ethics of Artificial Intelligence // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 3, pp. 226–236. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-226-236 (In Russian)

Abstract

The research is devoted to the issue of creating a safe and reliable artificial intelligence (AI) system. **Objective:** to create a clear list of requirements for future standards in the field of ethics of artificial intelligence in order to bridge the gap between theory and practice. **Methods:** methods of induction and synthesis, comparative analysis and analogy are used. **Results:** an analysis of the existing guidelines on AI ethics was carried out and it was concluded that it contains mainly general recommendations, without specific technical rules. Possible errors and the reasons for the difficulty of holding potentially responsible parties accountable in the field of AI implementation are presented. A three-component list of requirements for artificial intelligence technologies and the relevant data on the basis of which they are defined has been developed; a step-by-step plan for integrating ethical principles into practical aspects of development and regulation has been proposed. **The practical significance** lies in offering a framework for national and international regulatory documents that will ensure the safe use of the technology and increase user confidence.

Keywords: artificial intelligence, standardization, AI ethics, trust in technology, stages of standards implementation

References

1. Sajgitmagomedova Kh. S. Pravovoe regulirovanie sistem iskusstvennogo intellekta [Legal Regulation of Artificial Intelligence Systems], *Pravo. Yuridicheskie nauki [Law. Legal Sciences]*, 2024, no. 1, pp. 88–90. (In Russian)
2. Mezhdunarodnaya organizatsiya po standartizatsii. ISO/IEC TR 24028:2020. Informatsionnaya tekhnologiya. Iskuststvennyj intellekt. Obzor dostovernosti sistem iskusstvennogo intellekta [International Organization for Standardization. ISO/IEC TR 24028:2020. Information Technology. Artificial Intelligence. Overview of Trustworthiness in Artificial Intelligence], 2020. URL: <https://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=6528606&ysclid=mgs7q0hbf5842444073> (accessed: June 12, 2026). (In Russian)
3. Komissiya evropejskikh soobshchestv. Rukovodstvo po etike iskusstvennogo intellekta [European Commission. Guidelines on the Ethics of Artificial Intelligence], 2024. URL: <https://www.coe.int/en/web/artificial-intelligence/cai> (accessed: June 10, 2026). (In Russian)
4. Rekomendatsii YUNESKO po etike iskusstvennogo intellekta [UNESCO. Recommendations on the Ethics of Artificial Intelligence], 2024. URL: <https://www.unesco.org/en/artificial-intelligence/recommendation-ethics> (accessed: June 13, 2026). (In Russian)
5. Printsipy ob"yasnimogo iskusstvennogo intellekta [Principles of Explainable Artificial Intelligence], 2020. URL: <https://d-russia.ru/v-ssha-sformulirovany-4-principa-objasnimogo-iskusstvennogo-intellekta.html?ysclid=mgs7oa9pwj769887440> (accessed: June 11, 2026). (In Russian)
6. Shlyapnikov V. V. Iskuststvennyi intellekt: empatiya i podotchyotnost [Artificial Intelligence: Empathy and Accountability], *Obshchestvo. Sreda. Razvitie [Society. Environment. Development]*, 2022, no. 3 (64), pp. 100–103. DOI: 10.53115/19975996_2022_03_100-103. (In Russian)
7. Kozlovskij V. N., Blagoveshchenskij D. I., Panyukov D. I., Gafarov R. R. Tsifrovizatsiya i problemy trudovykh kollektivov: roli i otvetstvennost [Digitalization and Challenges for Work Collectives: Roles and Responsibilities], *Standarty i kachestvo [Standards and Quality]*, 2022, no. 1, pp. 94–98. (In Russian)

8. Jobin A., Ienca M., Vayena E. The Global Landscape of AI Ethics Guidelines, *Nature Machine Intelligence*, September 2019, no. 1 (2). DOI: 10.1038/s42256-019-0088-2
9. Floridi L. The Ethics of Artificial Intelligence: Principles, Challenges, and Opportunities. Oxford: Oxford University Press, 2023, 243 p.
10. Obnaruzhenie i ustranenie algoritmicheskogo smeshcheniya [Detection and Mitigation of Algorithmic Bias], 2025. URL: <https://gimal-ai.ru/blog/obnaruzhenie-i-ustranenie-algoritmicheskogo-smeshcheniya/?ysclid=mgs7ld6188973197446> (accessed: June 10, 2026). (In Russian)
11. Kisulenko B. V. Reglamentatsiya kiberbezopasnosti avtomobilei na osnove riskov [Regulation of Automotive Cybersecurity Based on Risks], *Standarty i kachestvo [Standards and Quality]*, 2022, no. 3, pp. 104–107. (In Russian)
12. Standartizirovannaya otchetnost' v razrabotkakh sistem iskusstvennogo intellekta [Standardized Reporting in the Development of Artificial Intelligence Systems], 2024. URL: <https://webiomed.ru/blog/standartizovannaia-otchetnost-v-razrabotkakh-sistem-ii/?ysclid=mgs7w0usnc229703660> (accessed: June 14, 2025). (In Russian)

Received: July 03, 2026

Accepted: July 31, 2026

Author's information:

Anastasia N. FEDOROVA — Master's Student; fedorovaAN2003@yandex.ru

Liliya F. KAZANSKAYA — Dr. Sci. in Engineering, Professor; yalifa@inbox.ru