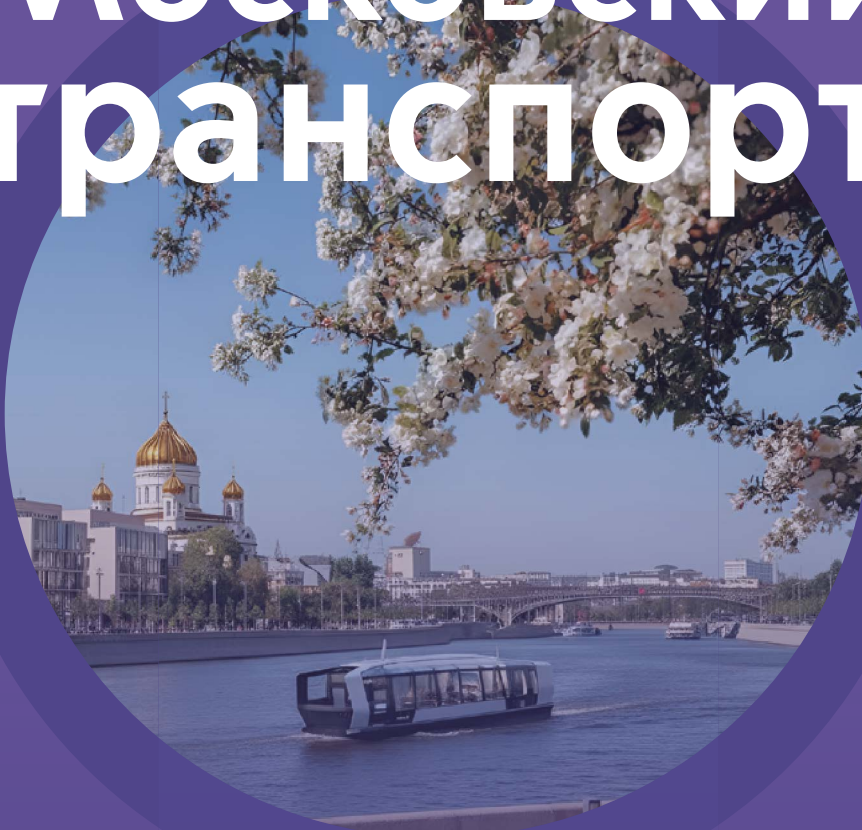




МосТрансПроект

Московский транспорт



Наука
и проектирование

№ 1 (5)
2 0 2 6



НАУЧНЫЙ
ЖУРНАЛ

НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
ИНСТИТУТА
«МОСТРАНСПРОЕКТ»

ISSN: 3034-5162

SCIENTIFIC
JOURNAL

OF THE RESEARCH
INSTITUTE
«MOSTRANSPROJECT»

ISSN: 3034-5162

2026 № 1 (5)

Научный журнал Учредитель НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ «МОСТРАНСПРОЕКТ» Основан в 2025 г. При перепечатке материалов ссылка на жур- нал «Московский транспорт. Наука и проек- тирование» обязательна. Рукописи, не при- нятые к публикации, не возвращаются. Мнение редакции и членов редколлегии может не совпадать с точкой зрения авторов публикаций. © ГБУ «МосТрансПроект», 2026	Scientific Journal Founder RESEARCH INSTITUTE «MOSTRANSPROJECT» Founded in 2025 When reprinting materials, a reference to the journal «Moscow Transport. Science and Design» is required. Manuscripts which were not accepted for publication will not be returned. The opinion of the editorial board and its members may not coincide with the viewpoint of the authors of publications. © SBI «MosTransProject», 2026
---	---



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

Гришин Виктор Иванович – доктор экономических наук, профессор, председатель экспертного совета по науке при Департаменте транспорта и развития дорожно-транспортной инфраструктуры г. Москвы, научный руководитель ГБУ «МосТрансПроект»

Ответственный секретарь

Косарева Елена Александровна – кандидат экономических наук, главный научный сотрудник ГБУ «МосТрансПроект»

Члены редакционной коллегии

Абдурахманов Каландар Ходжаевич – академик Академии наук Республики Узбекистан, профессор, доктор экономических наук

Асаул Николай Анатольевич – доктор экономических наук, профессор, директор ГУП «Мосгортранс», заведующий кафедрой «Автомобильные перевозки» ФГБОУ ВО МАДИ

Белов Александр Владимирович – кандидат технических наук, руководитель проектов Инновационного центра «Безопасный транспорт» ГУП «Московский метрополитен»

Гришина Ольга Алексеевна – доктор экономических наук, профессор, руководитель экспертной группы ГБУ «МосТрансПроект»

Дементьев Виктор Евгеньевич – член-корреспондент Российской академии наук, доктор экономических наук, профессор, руководитель научного направления «Макроэкономика и институциональная теория» ФГБУН ЦЭМИ РАН

Жанказиев Султан Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Организация и безопасность движения, интеллектуальные транспортные системы» ФГБОУ ВО МАДИ

Зайченко Николай Михайлович – доктор технических наук, профессор, ректор Донбасской национальной академии строительства и архитектуры ФГБОУ ВО ДонНАСА, ДНР

Кудрявцев Сергей Анатольевич – член-корреспондент Российской академии архитектуры и строительных наук, доктор технических наук, профессор, заслуженный строитель Российской Федерации, заведующий кафедрой «Мосты, тоннели и подземные сооружения» ФГБОУ ВО ДВГУПС

Купчикова Наталья Викторовна – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ГБУ «МосТрансПроект»

Нгуен Чонг Там – заведующий кафедрой «Железнодорожный путь и метрополитен», кандидат технических наук, профессор Хошиминского университета транспорта, г. Хошимин (Вьетнам)

Розенберг Игорь Наумович – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, научный руководитель, заведующий кафедрой «Геодезия, геоинформатика и навигация» ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ)

Сахненко Маргарита Александровна – кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Водные пути, порты и портовое оборудование» Академии водного транспорта ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ)

Федоров Виктор Сергеевич – академик Российской академии архитектуры и строительных наук, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные конструкции, здания и сооружения» ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ)

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
ИНСТИТУТА
«МОСТРАНСПРОЕКТ»
№ 1 (5) 2026**

Ответственный секретарь:

Е. А. Косарева

Выпускающий редактор:

В. В. Кузнецов

Редактор: Н. В. Юркень

Переводчик: Е. С. Романова

Верстка: А. В. Таскаева

Оформление обложки:

М. Ю. Чиркина

Адрес редакции:

101000, г. Москва,

Потаповский пер., д. 3, стр. 1

Тел.: +7 (495) 419-04-86 (доб. 443, 262)

e-mail: nicenter@mtp.mos.ru

Подписано в печать 23.03.2026

Формат 60 x 84 /8

Печ. л. 5,94.

Усл. печ. л. 12.

Тираж 200 экз.

(первый завод – 50 экз.).

Заказ № 5

Содержание

Транспортные системы

Н. В. Павлов, А. Р. Платова, А. Е. Чекмарев, Д. Г. Плотников

Принципы доступности, безопасности и комфорта в проектировании трамвайных узлов Москвы 8

А. Ф. Слутин, А. В. Берилов, М. Ю. Румянцев

Электромашинная имитационная технология стендовых испытаний комплектов тягового электрооборудования колесных транспортных средств с электродвижением 19

Строительство

В. П. Титов, Ю. В. Лазуткин

Конструктивные решения проекта реконструкции трамвайного депо имени Апакова..... 27

Т. В. Золина, Ю. А. Болдырева, Н. В. Купчикова

Моделирование управления правовыми рисками при проектировании высотных объектов в составе транспортно-пересадочных узлов..... 37

П. А. Кореньков, С. Е. Хохлунов

Оценка живучести железобетонных рамных конструкций транспортных сооружений при хрупком и пластическом разрушении 47

Е. В. Тарарушкин, А. А. Провоторов

Фосфогипсовое вяжущее для транспортного строительства..... 56

Компьютерные науки и информатика

А. В. Белов

Классификация уровней подключенности транспортных средств на основе моделей взаимодействия агентов и коммуникационных паттернов распределенных систем..... 64

Экономика

Н. А. Асаул, Д. А. Полунин

Внедрение электронного путевого листа в ГУП «Мосгортранс»: опыт цифровой трансформации пассажирского транспорта мегаполиса..... 76

О. О. Гринева, Д. С. Вьюнова, М. В. Кларин, И. В. Лопатинская

Кадры для транспорта будущего: исследование барьеров инженерного образования 85

EDITORIAL BOARD

Editor-in-chief

Grishin Viktor Ivanovich – Doctor of Economics, Professor, Chairman of the Expert Council on Science at the Department of Transport and Development of Road and Transport Infrastructure of Moscow, Scientific Director of the SBI «MosTransProject»

Executive Secretary

Kosareva Elena Alexandrovna – Candidate of Economic Sciences, Chief Researcher at SBI «MosTransProject»

Members of the Editorial Board

Abdurakhmanov Kalandar Khodzhaevich – Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Professor, Doctor of Economic Sciences

Asaul Nikolay Anatolyevich – Doctor of Economic Sciences, Professor, Director of State Unitary Enterprise «Mosgortrans» (Moscow City Transport), Head of the Department of «Automobile Transportation» at Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Moscow Automobile and Road Construction State Technical University» (MADI)

Belov Alexander Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, Project Manager at the Innovation Center «Safe Transport», State Unitary Enterprise «Moscow Metro»

Grishina Olga Alekseevna – Doctor of Economic Sciences, Professor, Head of the Expert Group at State Budgetary Institution «MosTransProject»

Dementiev Viktor Evgenievich – Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Economic Sciences, Professor, Head of the Scientific Direction «Macroeconomics and Institutional Theory», Federal State Budgetary Institution of Science «Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences» (CEMI RAS)

Zhankaziev Sultan Vladimirovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department «Traffic Organization and Safety, Intelligent Transport Systems» at Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)

Zaichenko Nikolai Mikhailovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector of the Donbass National Academy of Construction and Architecture, Federal State Budgetary Institution of Higher Education DonNASA, Donetsk People's Republic

Kudryavtsev Sergey Anatolyevich – Corresponding Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Builder of the Russian Federation, Head of the Department «Bridges, Tunnels and Underground Structures» at the Far Eastern University of Railway Transport

Kupchikova Natalia Viktorovna – Doctor of Technical Sciences, Professor, Senior Researcher at SBI «MosTransProject»

Nguyen Trong Tam – Head of the Department «Railway Track and Metro», Candidate of Technical Sciences, Professor at Ho Chi Minh City University of Transport, Ho Chi Minh City (Vietnam)

Rosenberg Igor Naumovich – Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Technical Sciences, Professor, Scientific Director and Head of the Department of «Geodesy, Geoinformatics and Navigation» at the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Russian University of Transport» (Moscow Institute of Transport Engineers)

Sakhnenko Margarita Aleksandrovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of «Waterways, Ports and Port Equipment» at the Academy of Water Transport of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Russian University of Transport» (Moscow Institute of Transport Engineers)

Fedorov Viktor Sergeevich – Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department «Building Structures, Buildings and Facilities» at the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Russian University of Transport» (RUT MIIT)

SCIENTIFIC JOURNAL OF THE RESEARCH INSTITUTE «MOSTRANSPROJECT» No. 1 (5) 2026

Executive Secretary: E. A. Kosareva

Managing editor: V. V. Kuznetsov

Editor: N. V. Yourken

Translator: E. S. Romanova

Layout: A. V. Taskaeva

Cover Design: M. Y. Chirkina

Editorial office address:

101000, Moscow, Potapovsky Lane, 3,
Building 1

Tel.: +7 (495) 419-04-86 (ext. 443, 262)

E-mail: nicenter@mtp.mos.ru

Signed for printing

on March 23, 2026

Format 60 x 84/8

Printed sheets: 5.94

Conventional printed sheets: 12

Print run: 200 copies.
(first batch — 50 copies).
Order No. 5

Content

Transport Systems

N. V. Pavlov, A. R. Platova, A. E. Chekmarev, D. G. Plotnikov

Principles of Accessibility, Safety, and Comfort in the Design of Moscow's
Tram Hubs..... 8

A. F. Slutin, A. V. Berilov, M. Y. Rummyantsev

Electric Machine Simulation Technology for Bench Testing of Traction
Electrical Equipment Sets for Wheeled Electric Vehicles..... 19

Construction

V. P. Titov, Y. V. Lazutkin

Structural Design Solutions for The Reconstruction Project of the Apakov
Tram Depot 27

T. V. Zolina, Y. A. Boldyreva, N. V. Kupchikova

Modelling Legal Risk Management in the Design of High-Rise Buildings
within Transport Interchange Hubs..... 37

P. A. Korenkov, S. E. Khokhlunov

Survivability Assessment of Reinforced Concrete Frame Structures in
Transport Facilities under Brittle and Ductile Destruction..... 47

E. V. Tararushkin, A. A. Provotorov

Phosphogypsum Binder for Transport Construction 56

Computer Sciences and Informatics

A. V. Belov

Classification of Vehicle Connectivity Levels Based on Agent Interaction
Models and Communication Patterns of Distributed Systems..... 64

Economics

N. A. Asaul, D. A. Polunin

Implementation Of The Electronic Waybill At Sue «Mosgortrans»:
the Experience of Digital Transformation in Metropolitan
Passenger Transport 76

O. O. Grineva, D. S. Vyunova, M. V. Klarin, I. V. Lopatinskaya

Personnel for the Transport of the Future: a Study
of Barriers in Engineering Education 85

УДК: 656.1/.5

ПРИНЦИПЫ ДОСТУПНОСТИ, БЕЗОПАСНОСТИ И КОМФОРТА В ПРОЕКТИРОВАНИИ ТРАМВАЙНЫХ УЗЛОВ МОСКВЫ

Н. В. Павлов

А. Р. Платова

ФАУ Российский дорожный научно-исследовательский институт («РОСДОРНИИ»)

А. Е. Чекмарев

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта» (РУТ МИИТ)

Д. Г. Плотников

*ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(СПбПУ)*

Аннотация. Статья посвящена разработке принципов проектирования трамвайных остановок Москвы, ориентированных на создание безопасной, доступной и комфортной среды для пассажиров. Актуальность исследования обусловлена ключевой ролью остановочных пунктов в восприятии качества транспортного сервиса и необходимостью их модернизации в соответствии со стратегическими целями развития городской мобильности.

На основе комплекса методов, включая нормативно-правовой и сравнительный анализ отечественных и зарубежных (Германия, Чехия) нормативов, а также натурные обследования инфраструктуры, выявлены системные проблемы: фрагментарность нормативной базы, недостаточный уровень безопасности и оснащенности современными сервисами. По данным обследования, лишь 34% остановок адаптированы для маломобильных групп населения, а доля электронных табло не превышает 13%. В результате исследования сформулирован комплекс принципов и конкретных инженерно-технических рекомендаций. Ключевые предложения включают обязательное устройство приподнятых платформ и защитных ограждений, внедрение тактильной навигации, дублирование переходов, зонированное нормированное освещение и интеграцию цифровых сервисов (Wi-Fi, USB-зарядки). Делается вывод о необходимости разработки единого стандарта проектирования, сочетающего четкие технические требования с гибким, целевым подходом, что позволит трансформировать остановки в multifunctional public spaces и повысить привлекательность трамвайного транспорта.

Ключевые слова: комфортная городская среда, трамвайные остановки, безопасность пассажиров, доступная среда, транспортная доступность.

UDC: 656.1/.5

PRINCIPLES OF ACCESSIBILITY, SAFETY, AND COMFORT IN THE DESIGN OF MOSCOW'S TRAM HUBS

N. V. Pavlov

A. R. Platova

Russian Road Research Institute (FAU «ROSDORNII»)

A. E. Chekmarev

Russian University of Transport (RUT MIIT)

D. G. Plotnikov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)

Abstract. This article focuses on the development of design principles for Moscow's tram hubs, aimed at creating a safe, accessible, and comfortable environment for passengers. The relevance of the study is driven by the central role that stop facilities play in shaping passengers' perception of transport service quality, and by the need to modernise these facilities in line with the strategic objectives of urban mobility development. The study draws on a combination of methods, including regulatory and comparative analysis of domestic and foreign standards (Germany and the Czech Republic) and on-site infrastructure surveys, to identify a number of systemic issues: a fragmented regulatory framework, insufficient safety levels, and inadequate provision of modern passenger services. Survey data show that only 34% of hubs are adapted for people with reduced mobility, while electronic passenger information displays are present at no more than 13% of hubs. The study produces a set of principles and specific engineering recommendations. Key proposals include the mandatory installation of raised boarding platforms and solid protective barriers, the introduction of tactile navigation, the duplication of crossings, zoned standardized lighting, and the integration of digital services (Wi-Fi and USB charging ports). The article concludes that a unified design standard is needed, combining clear technical requirements with a flexible, outcome-oriented approach, which would enable stops to be transformed into multifunctional public hubs and increase the overall attractiveness of tram transport.

Keywords: comfortable urban environment, tram hubs, passenger safety, accessible environment, transport accessibility.

Введение

Трамвайная система Москвы, функционирующая более столетия, представляет собой устойчивый и экологически эффективный компонент общественного транспорта мегаполиса. Несмотря на конкуренцию со стороны метрополитена и наземных скоростных систем, трамвай сохраняет свою значимость для обеспечения мобильности в ряде городских районов, выступая связующим звеном в единой транспортной карте города.

В этой системе остановочный пункт играет роль критически важной зоны взаимодействия между пользователем и транспортным средством. Именно это пространство, где начинается и завершается поездка, формирует первичное восприятие качества всего транспортного сервиса. Ее функциональность, безопасность и комфорт напрямую определяют субъективную привлекательность общественного транспорта для пассажира, влияя на распределение перевозок по видам транспорта в пользу экологичных видов передвижения [1].

Трамвайная система города Москвы является самой инновационной: около 700 тыс. поездок в сутки, свыше 35 маршрутов, более 600 трамваев в парке, 418 км пути, 80% трамвайных путей

обособлены от автомобилей, на 95% обновлен подвижной состав [2]. В свете растущих требований к качеству городской среды, обозначенных в стратегических документах развития Москвы, задача модернизации и гуманизации подобных узловых точек становится приоритетной. Она требует комплексного подхода, объединяющего вопросы архитектурного проектирования, инженерной безопасности, эргономики и нормативного регулирования.

Целью настоящего исследования является системный анализ и структурирование подходов к обеспечению безопасности и комфорта на трамвайных остановках Москвы. Для ее достижения поставлены следующие взаимосвязанные задачи: проведение диагностики текущего состояния инфраструктуры, анализ действующей нормативно-правовой базы и оценка типовых проектных решений. Результатом работы должна стать концептуальная модель, интегрирующая лучшие практики и предлагающая принципы для проектирования остановочных пунктов, отвечающих вызовам современного мегаполиса.

Методы

В работе применен комплекс взаимодополняющих методов, направленных на всесторонний анализ текущего состояния и разработку научно обоснованных предложений по модернизации трамвайных остановок Москвы.

1. Нормативно-правовой и сравнительный анализ. Проведено изучение отечественной и зарубежной нормативной базы, регулирующей проектирование и эксплуатацию остано-

вочных пунктов [3–13] и лучшие зарубежные практики [14, 15]. Целью было выявление пробелов, противоречий и формулирование принципов для создания единого стандарта.

2. Натурные обследования и анализ оперативных данных. Для оценки фактического состояния инфраструктуры использовались инструменты полевого обследования выборочных остановок, а также данные системы

управления задачами (СКК Tracking), предоставленные Департаментом транспорта Москвы. Это позволило получить объективную картину оборудования, выявить типовые дефекты и отклонения от норм.

3. Разработка рекомендаций на основе комплексного анализа. На основании данных, полученных в ходе нормативно-правового анализа и натурных обследований (пункты 1–2), были сформулированы конкретные инженерно-технические и организационные рекомендации по обеспечению безопасности

Результаты и обсуждение

Нормативно-правовой и сравнительный анализ

Анализ действующей отечественной нормативной и нормативно-технической документации, регламентирующей организацию и обустройство остановочных пунктов трамвая, позволяет выявить ряд системных проблем.

Ключевые выводы заключаются в следующем:

1. требования к остановочным пунктам носят фрагментарный характер и не систематизированы в единый специализированный стандарт;
2. в различных документах присутствуют противоречия в подходах к строительству и обустройству данных объектов;
3. вопросы находятся в зоне ответственности различных ведомств (органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации и местного самоуправления), что обуславливает необходимость сложных межведомственных согласований при проектировании и эксплуатации.
4. остановочные пункты как элемент транспортной инфраструктуры недооценены, а их создание часто осуществляется по остаточному принципу.
5. существуют значительные сложности при реализации проектов в стесненных условиях сложившейся городской застройки и инфраструктуры.

Указанные проблемы свидетельствуют о необходимости разработки комплексного и системного подхода к регулированию, требующего учета множества факторов и обеспечения эффективного взаимодействия всех заинтересованных сторон. Одним из путей решения может стать создание единых правил проектирования, строительства и обустройства трамвайных остановок.

и комфорта на остановочных пунктах трамвая. Эти рекомендации охватывают ключевые аспекты: параметры платформ и ограждений, систему освещения, организацию безопасных пешеходных подходов, а также набор пассажирских сервисов и элементов навигации, направленных на повышение удобства пользования.

Применение указанного комплекса методов обеспечило исследованию необходимую глубину, системность и практическую применимость полученных результатов.

Анализ зарубежной нормативной базы (на примере Федеративной Республики Германия и Чешской Республики), регламентирующей обустройство остановочных пунктов трамвая, позволил сформулировать ряд выводов:

1. требования к остановочным пунктам также не кодифицированы в единый исчерпывающий документ, а представлены в виде комплекса взаимосвязанных нормативов.
2. ключевой особенностью является принципиально-целевой подход: документы формулируют прежде всего цели, общие принципы организации и качественные ориентиры для создания остановок, а не исчерпывающие технические предписания.
3. данная система отличается повышенной гибкостью, предоставляя проектировщикам возможность вариативного решения в зависимости от конкретных градостроительных условий.

Сравнительный анализ выявил контраст между российской практикой, характеризующейся более детальными и жесткими техническими нормативами, и европейским подходом, акцентированным на достижении качественных результатов. Положительные аспекты зарубежного опыта, в частности его адаптивность и ориентация на конечного пользователя, являются значимыми для потенциальной адаптации в рамках разработки комплексного руководства для городской среды, например для г. Москвы.

Натурные обследования и анализ оперативных данных

На основе проведенного обследования инфраструктуры московского трамвая можно представить следующие количественные характеристики обустройства остановочных пунктов (ОП). Общее количество действующих ОП составляет порядка

840 единиц, из которых 141 ($\approx 17\%$) интегрированы с остановками иных видов транспорта, а 699 ($\approx 83\%$) являются обособленными.

Оснащенность элементами благоустройства и сервиса распределена следующим образом:

базовая инфраструктура (урны — 91%, лавочки — 68%);

безопасность и доступность (ограждения всех типов — 31%, тактильная плитка — 10%). При этом для использования маломобильными группами населения адаптировано 289 ОП ($\approx 34\%$ от общего числа);

информационные системы и современный сервис (информационные стенды — 24%, боковые

носители с названием станции — 20%, USB-зарядные устройства — 27%, электронные табло времени прибытия — 13%).

Из общего числа ОП 644 ($\approx 77\%$) оборудованы павильонами ожидания, в то время как 159 ($\approx 19\%$) функционируют без них. Отдельно отмечается, что около 300 павильонов относятся к конструкциям нового типа. Один остановочный пункт («Красностуденческий проезд») имеет статус объекта культурного наследия.

Выявленные ключевые проблемы можно разделить на две категории: в области безопасности и в области комфорта.

1) В области безопасности (рисунки 1–2).



*Рис. 1. Высадка пассажиров на проезжую часть при отсутствии приподнятых платформ.
Источник: авторы исследования*

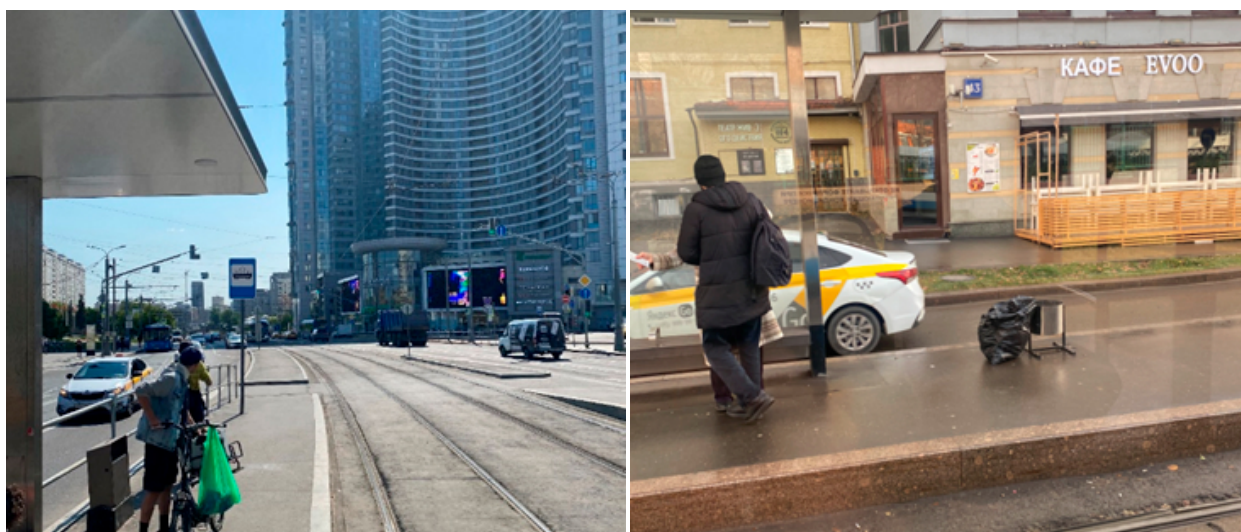


Рис. 2. Отсутствие сплошных непроницаемых ограждений между платформой и проезжей частью приводит к попаданию брызг и грязи на пассажиров. Источник: авторы исследования

2) В области комфорта (рисунки 3–6).



*Рис. 3. «Случайный» характер оборудования (разнотипные урны без пепельниц, различные скамейки).
Источник: авторы исследования*



*Рис. 4. Неполная защита от осадков из-за конструктивных зазоров между крышей павильона и трамваем.
Источник: авторы исследования*



Рис. 5. Наличие препятствий (малые архитектурные формы, коммуникационные столбы) в зонах видимости при посадке/высадке. Источник: авторы исследования



Рис. 6. Парковки средств индивидуальной мобильности (СИМ) не используются из-за неудобного расположения. Источник: авторы исследования

Разработка рекомендаций на основе комплексного анализа

1. Организация остановок общественного транспорта базируется на четырех ключевых принципах, направленных на повышение эффективности и качества транспортного обслуживания.

Доступность:

- территориальная и пространственная доступность;
- обеспечение беспрепятственного доступа для маломобильных групп населения (МГН);
- комплексное информационное обеспечение пользователей.

Безопасность:

- безопасный доступ к посадочной площадке;
- минимизация конфликтов между пешеходами и транспортными средствами;
- создание безопасных условий ожидания.

Комфорт:

- оптимизация процедуры посадки и высадки пассажиров;
- повышение регулярности и скорости движения по маршруту.

Интуитивность:

- исключение физических и информационных

- барьеров на пути пользователя;
- быстрая идентификация и навигация в пределах остановочного пункта.

Реализация данных принципов способствует созданию удобной, безопасной и привлекательной транспортной среды.

2. Последовательность и принципы размещения трамвайных остановок.

Анализ существующей ситуации (включая оценку текущего расположения остановок на местности, анализ удобства подходов, пешеходной доступности и потенциала пересадок). Для определения Максимального допустимого расстояния пешеходной доступности до остановок наземного городского пассажирского транспорта необходимо руководствоваться нормативами градостроительного проектирования города Москвы в области транспорта, автомобильных дорог регионального или межмуниципального значения [16].

Идентификация пассажиропотока и точек притяжения, включая определение ключевых объектов-генераторов поездок в пешеходной доступности (станции метро и МЦД, пересадочные узлы, торгово-деловые центры).

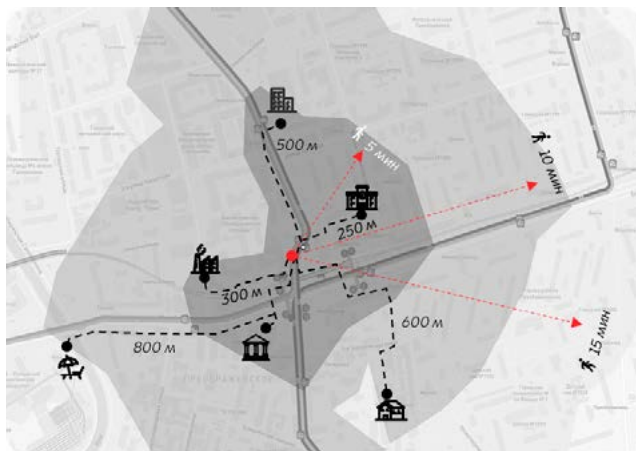


Рис. 7. Изохроны пешеходной доступности. Источник: авторы исследования

Определение оптимального местоположения (максимальное удобство для пассажиров, соблюдение оптимальной длины перегона, обеспечение удобных пересадок, учет организации движения и наличия пространства для инфраструктуры).

В соответствии с информацией Департамента транспорта и дорожно-транспортной инфраструктуры г. Москвы, продолжительность стоянки трамвая на остановочных пунктах в Москве

составляет не более 0,5 мин, а средняя дальность поездки пассажира на маршруте — не более 3 км. Оптимальная длина перегона между остановками прямо пропорциональна средней продолжительности поездки пассажира на маршруте, таким образом рекомендуемое расстояние между остановочными пунктами для Москвы составит 370–450 м.

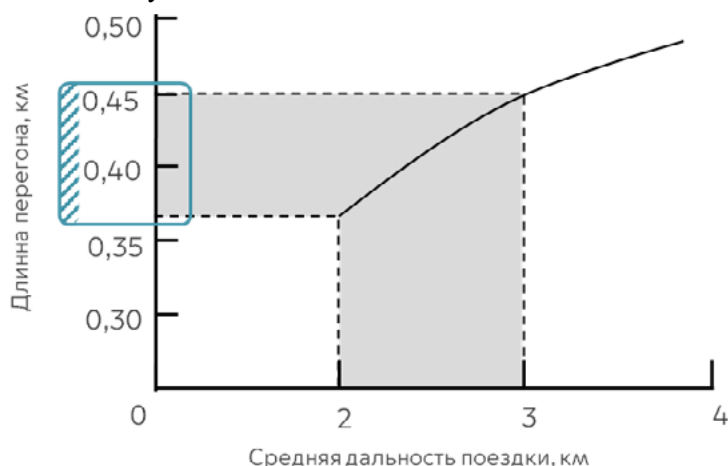


Рис. 8. График определения оптимальной длины перегона. Источник: авторы исследования

3. Размещение и обустройство ОП с учетом безопасности, доступности и удобства для пользователей

Проектирование трамвайной остановки должно базироваться на холистическом подходе, где каждый элемент — от расположения в городской ткани до характеристик тактильной плитки — работает на достижение триединой цели: безопасность, доступность, комфорт. Внедрение стандартизированных, но гибких модульных решений, подробно регламентированных в нормативной документации, позволяет тиражировать успешные практики. Такой подход трансформирует остановку из простой точки посадки/высадки в полноценный общественный хаб, повышающий привлекательность и устойчивость городского пассажирского транспорта в целом.

Безопасность как системообразующий принцип

Категорически недопустима высадка пассажиров на необорудованную проезжую часть, так как это создает прямую угрозу безопасности из-за конфликта с попутным транспортом, блокирует доступ для маломобильных групп населения и снижает эксплуатационную эффективность системы, увеличивая время стоянки и задерживая движение. Любая, даже минимальная, посадочная платформа является обязательным инфраструктурным элементом, обеспечивающим базовый уровень безопасности, доступности и регуляр-

ности перевозок.

Подходы к ОП проектируются с обязательным устройством наземных пешеходных переходов, дублирующих подземные. На бессветофорных магистралях, где наземный переход невозможен, подземные переходы оборудуются лифтами. Устанавливаются непроницаемые ограждения, выполняющие двойную функцию: защита пассажиров от брызг и предотвращение их случайного выхода на проезжую часть.

Доступность для всех групп населения

По краю платформы размещается тактильная плитка с конусообразным рифлением. Все элементы навигации (название остановки, картосхемы) имеют строго регламентированные места и высоты размещения, обеспечивающие их легкое восприятие.

Уклоны пешеходных путей (продольный — не более 4%, поперечный — 0,5–2%) и пандусов (не более 5%) соответствуют нормам беспрепятственного движения. Ширина платформ (не менее 1,40–1,65 м (1,65 м при остановках берегового типа) и лифтов рассчитывается на одновременный проезд инвалидной и детской колясок.

Ключевым является правило, согласно которому если один переход на остановке надземный или подземный, второй должен быть наземным, что гарантирует альтернативный маршрут для всех пользователей.

Комфорт и пассажирские сервисы

Освещение зонировается с увеличением интенсивности от путевой зоны (20 лк) к зоне павильона (70–100 лк). Используются светодиодные приборы с теплой цветовой температурой (2700–2800 К), что снижает нагрузку на зрение в темное время суток.

Современный ОП включает комплекс устройств беспроводной связи (Wi-Fi), USB-порты для зарядки устройств (Type-A и Type-C), систему видеонаблюдения и информационные табло.

Обязательна установка урн с наклонными перфорированными крышками, а также организация парковок для СИМ, что способствует интермодальности и снижению нагрузки на дорожную сеть.

Таким образом, комплексное проектирование остановочных пунктов трамвая, интегрирующее принципы безопасности, универсальной доступности и пассажирского комфорта, является

Заключение

Проведенное исследование позволило провести системный анализ текущего состояния и разработать принципы проектирования трамвайных остановок Москвы, ориентированные на следующую цель: обеспечение безопасности, доступности и комфорта для пользователей остановочного пункта. Работа выявила ключевые системные проблемы, сдерживающие развитие остановочных пунктов как полноценных элементов транспортной инфраструктуры.

Основные выводы исследования заключаются в следующем:

1. Нормативно-правовой анализ показал фрагментарность и противоречивость отечественной нормативной базы, регулирующей обустройство трамвайных остановок, а также межведомственную разобщенность в вопросах их проектирования. В то же время изучение зарубежного опыта (Германии и Чехии) продемонстрировало эффективность принципиально-целевого и гибкого подхода, фокусирующегося на качественных результатах и удобстве пользователя, что является ценным для адаптации в российских условиях.
2. Результаты натурных обследований и анализа оперативных данных констатируют недостаточный уровень оснащенности московских трамвайных остановок, особенно в сферах безопасности (недостаток приподнятых платформ и защитных ограждений) и современного сервиса (низкая доля электронных табло,

не просто технической задачей, а ключевым элементом развития устойчивой и инклюзивной городской мобильности.

Синергия рассмотренных мер — от обязательного устройства платформ и дублирования переходов до внедрения тактильной навигации, нормированного освещения и цифровых сервисов — трансформирует остановку в многофункциональный общественный хаб. Такой подход оптимизирует пассажиропоток, минимизирует риски, обеспечивает равный доступ для всех групп населения и в конечном итоге повышает привлекательность общественного транспорта. Реализация данных принципов в рамках стандартизированных модульных решений создаст основу для тиражирования эффективной модели, способствующей достижению стратегических целей в области транспортного планирования, социального равенства и повышения качества городской среды.

USB-зарядок). Выявлены типовые проблемы, такие как высадка пассажиров на проезжую часть, отсутствие универсальной доступности и нерациональное размещение элементов обустройства.

3. На основе комплексного анализа сформулированы принципы и конкретные рекомендации по проектированию остановочных пунктов. Ключевыми предлагаемыми подходами являются:
 - обязательное устройство посадочных платформ, дублирование надземных/подземных переходов наземными, установка непроницаемых ограждений;
 - внедрение тактильной навигации, строгое нормирование параметров пешеходных путей и платформ для маломобильных групп населения, обеспечение альтернативных маршрутов;
 - зонированное нормированное освещение, интеграция цифровых сервисов (Wi-Fi, USB-зарядки, информационные табло), стандартизация элементов благоустройства (урны, скамейки), организация парковок для средств индивидуальной мобильности.

Реализация предложенных мер требует разработки и внедрения единого стандарта или комплексного руководства по проектированию трамвайных остановок для Москвы. Такой документ должен интегрировать лучшие отечественные и зарубежные практики, сочетая четкие технические требования с целевым принципом, предоставляющим проек-

тировщикам гибкость для адаптации к конкретным градостроительным условиям.

Внедрение описанных принципов трансформирует остановочный пункт из простой функциональной точки в многофункциональный общественный хаб. Это способствует повышению привлекательности, безопасности и эффектив-

ности трамвайного транспорта, оптимизации пассажиропотоков, обеспечению равного доступа к транспортным услугам и, в конечном итоге, развитию устойчивой и доступной всем городской мобильности в соответствии со стратегическими целями развития Москвы.

Список литературы

1. Горев А. Э. Развитие городских транспортных систем крупных городов / А. Э. Горев // Транспорт Российской Федерации. — 2016. — № 6 (67). — С. 50–53. — EDN XROJPL.

2. Территориально-пространственное развитие трамвайной транспортной инфраструктуры Москвы и ее влияние на существующую застройку / В. П. Титов, В. И. Гришин, Н. В. Купчикова, Ю. В. Лазуткин // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. — 2024. — № 3 (49). — С. 40–49. — DOI: 10.52684/2312–3702–2024–49–3–40–49. — EDN GWIOUT.

3. Федеральный закон «Устав автомобильного транспорта и городского наземного электрического транспорта» от 08.11.2007 № 259-ФЗ (дата обращения: 15.01.2026).

4. Федеральный закон «Об автомобильных дорогах и о дорожной деятельности в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 08.11.2007 № 257-ФЗ (дата обращения: 15.01.2026).

5. Постановление Правительства РФ «Об утверждении Правил перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом» от 01.10.2020 № 1586 (дата обращения: 15.01.2026).

6. ГОСТ Р 58287–2018. Отличительные знаки и информационное обеспечение транспортных средств пассажирского наземного транспорта, остановочных пунктов и автостанций. Общие технические требования. — М.: Стандартинформ, 2018. — 14 с.

7. ГОСТ Р 52766–2007. Дороги автомобильные общего пользования. Элементы обустройства. Общие требования. — М.: Стандартинформ, 2007. — 48 с.

8. СП 42.13330.2016. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских

поселений (дата обращения: 15.01.2026).

9. СП 396.1325800.2018. Улицы и дороги населенных пунктов. Правила градостроительного проектирования (дата обращения: 15.01.2026).

10. СП 98.13330.2018. Трамвайные и троллейбусные линии (дата обращения: 15.01.2026).

11. СП 59.13330.2020. Свод правил. Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения (дата обращения: 15.01.2026).

12. Распоряжение Министерства транспорта Российской Федерации «Об утверждении социального стандарта транспортного обслуживания населения при осуществлении перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом» от 31 января 2017 г. № НА-19-р.

13. Распоряжение Правительства Москвы «Об утверждении Сводного стандарта благоустройства улиц Москвы» от 04.08.2016 № 387-ПП.

14. Регламент по проектированию, строительству и эксплуатации городских систем рельсового транспорта Федеративной Республики Германии (BOStrab).

15. Проектирование остановок и пересадочных узлов общественного транспорта. Standard zastávek PID: стандарт пересадочных узлов и остановок интегрированной системы общественного транспорта Праги и Среднечешского края / Ассоциация транспортных инженеров; под ред. В. Валдина; пер. с чеш. П. Кузина, Д. Лютова. — Санкт-Петербург: Коста, 2019. — 310 с.: ил., цв. ил. — (Библиотека транспортного инженера). — ISBN978–5–91258–424–4.

16. Постановление Правительства Москвы «Об утверждении нормативов градостроительного проектирования города Москвы в области транспорта, автомобильных дорог регионального или межмуниципального значения» от 23 декабря 2015 г. № 945-ПП (дата обращения: 15.01.2026).

References

1. Gorev A. E. Razvitie gorodskikh transportnykh sistem krupnykh gorodov [Development of urban transport systems in major cities] // Transport

Rossiiskoj Federatsii [Transport of the Russian Federation]. — 2016. — No. 6 (67). — P. 50–53. — EDN XROJPL. (In Russ.)

2. Titov V.P., Grishin V.I., Kupchikova N.V., Lazutkin Yu. V. Territorialno-prostranstvennoe razvitiye tramvajnoj transportnoj infrastruktury Moskvy i ee vliyanie na sushchestvuyushchuyu zastrojku [Territorial and spatial development of Moscow's tram transport infrastructure and its impact on the existing urban fabric] // Inzhenerno-stroitelnyy vestnik Prikaspiya [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region].— 2024.— No. 3 (49).— P. 40–49.— DOI: 10.52684/2312–3702–2024–49–3–40–49.— EDN GWIOUT. (In Russ.)
3. Federalnyy zakon «Ustav avtomobilnogo transporta i gorodskogo nazemnogo elektricheskogo transporta» ot 08.11.2007 No. 259-FZ [Federal Law «Charter of Road Transport and Urban Ground Electric Transport» dated 08.11.2007 No. 259-FZ].— (accessed: 15.01.2026). (In Russ.)
4. Federalnyy zakon «Ob avtomobilnykh dorogakh i o dorozhnoy deyatel'nosti v Rossijskoj Federatsii i o vnesenii izmenenij v otdelnye zakonodatelnye akty Rossijskoj Federatsii» ot 08.11.2007 No. 257-FZ [Federal Law «On Roads and Road Activities in the Russian Federation» dated 08.11.2007 No. 257-FZ].— (accessed: 15.01.2026). (In Russ.)
5. Postanovlenie Pravitelstva RF «Ob utverzhdenii Pravil perevozok passazhirov i bagazha avtomobilnym transportom i gorodskim nazemnym elektricheskim transportom» ot 01.10.2020 No. 1586 [Decree of the Government of the Russian Federation «On Approval of the Rules for the Carriage of Passengers and Luggage by Road and Urban Ground Electric Transport» dated 01.10.2020 No. 1586].— (accessed: 15.01.2026). (In Russ.)
6. GOST R58287–2018. Otlichitelnye znaki i informatsionnoe obespechenie transportnykh sredstv passazhirskogo nazemnogo transporta, ostanovochnykh punktov i avtostantsij. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya [Distinctive signs and information support for passenger road transport vehicles, stops and bus stations. General technical requirements].— Moscow: Standartinform Publ., 2018.— 14 p. (In Russ.)
7. GOST R52766–2007. Dorogi avtomobilnye obshchego polzovaniya. Elementy obustroystva. Obshchie trebovaniya [Public roads. Road equipment elements. General requirements].— Moscow: Standartinform Publ., 2007.— 48 p. (In Russ.)
8. SP 42.13330.2016. Gradostroitel'stvo. Planirovka i zastrojka gorodskikh i selskikh poselenij [Urban planning. Layout and development of urban and rural settlements].— (accessed: 15.01.2026). (In Russ.)
9. SP 396.1325800.2018. Ulitsy i dorogi naseleennykh punktov. Pravila gradostroitel'nogo proektirovaniya [Streets and roads of settlements. Urban design rules].— (accessed: 15.01.2026). (In Russ.)
10. SP 98.13330.2018. Tramvajnye i trolleybusnye linii [Tram and trolleybus lines].— (accessed: 15.01.2026). (In Russ.)
11. SP 59.13330.2020. Svod pravil. Dostupnost' zdaniy i sooruzhenij dlya malomobilnykh grupp naseleniya [Code of Rules. Accessibility of buildings and structures for persons with limited mobility].— (accessed: 15.01.2026). (In Russ.)
12. Rasporyazhenie Ministerstva transporta Rossijskoj Federatsii «Ob utverzhdenii sotsial'nogo standarta transportnogo obsluzhivaniya naseleniya pri osushchestvlenii perevozok passazhirov i bagazha avtomobilnym transportom i gorodskim nazemnym elektricheskim transportom» ot 31 yanvarya 2017 g. No. NA-19-r [Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation «On Approval of the Social Standard of Transport Services for the Population in the Carriage of Passengers and Luggage by Road and Urban Ground Electric Transport» dated 31 January 2017 No. NA-19-r]. (In Russ.)
13. Rasporyazhenie Pravitelstva Moskvy «Ob utverzhdenii Svodnogo standarta blagoustroystva ulits Moskvy» ot 04.08.2016 No. 387-RP [Order of the Moscow Government «On Approval of the Consolidated Standard for the Improvement of Moscow Streets» dated 04.08.2016 No. 387-RP]. (In Russ.)
14. BOStrab. Verordnung uber den Bau und Betrieb der Strassenbahnen [Regulations on the Construction and Operation of Trams (BOStrab)]. Federal Republic of Germany.
15. Proektirovanie ostanovok i peresadochnykh uzlov obshchestvennogo transporta. Standard zastavek PID: standart peresadochnykh uzlov i ostanovok integrirovannoj sistemy obshchestvennogo transporta Pragi i Sredne cheshskogo kraja [Design of Public Transport Stops and Transfer Hubs. Standard zastavek PID: Standard for Transfer Hubs and Stops of the Integrated Public Transport System of Prague and the Central Bohemian Region].— Trans. from Czech by P. Kuzin, D. Lyutov.— Saint Petersburg: Kosta Publ., 2019.— 310 p.— ISBN978–5–91258–424–4. (In Russ.)
16. Postanovlenie Pravitelstva Moskvy «Ob utverzhdenii normativov gradostroitel'nogo proektirovaniya goroda Moskvy v oblasti transporta, avtomobilnykh dorog regionalnogo ili mezhmunitsipalnogo znacheniya» ot 23 dekabrya 2015 g. No. 945-PP [Decree of the Moscow Government «On Approval of Urban Planning Standards for the City of Moscow in the Field of Transport and Regional or Inter-Municipal Roads» dated 23 December 2015 No. 945-PP].— (accessed: 15.01.2026). (In Russ.)

Сведения об авторах	Information about the authors
Павлов Никита Владимирович начальник отдела разработки документов по стандартизации, ФАУ «РОСДОРНИИ» Адрес: Российский дорожный научно-исследовательский институт, 125493, Россия, г. Москва, ул. Смольная, д. 2 ORCID: 0009-0003-2128-0697 E-mail: pavlovnv@rosdornii.ru	Pavlov Nikita Vladimirovich Head of the Department for Standardization Documents Development, FAU «ROSDORNII» Address: Russian Road Research Institute, 2, Smolnaya St., Moscow, 125493, Russia ORCID: 0009-0003-2128-0697 E-mail: pavlovnv@rosdornii.ru
Чекмарев Александр Евгеньевич заместитель директора Передовой инженерной школы «Академия ВСМ», ФГАУ ВО «Российский университет транспорта» (РУТ МИИТ) Адрес: Российский университет транспорта, 127994, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9 ORCID: 0009-0000-7643-0777 E-mail: a.chekmarev@rut.digital	Chekmarev Alexander Evgenyevich Deputy Director of the Advanced Engineering School «HSR Academy», RUT MIIT Address: Russian University of Transport, 127994, GSP-4, Moscow, Obraztsova str., 9, building 9 ORCID: 0009-0000-7643-0777 E-mail: a.chekmarev@rut.digital
Плотников Дмитрий Георгиевич кандидат технических наук, доцент Высшей школы транспорта, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого Адрес: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д. 29 литера Б ORCID: 0000-0003-1342-1608 E-mail: plotnikov_dg@spbstu.ru	Plotnikov Dmitry Georgievich Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Graduate School of Transport, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU) Address: Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, 195251, St. Petersburg, Vn. Ter., Municipal District of Akademicheskoye, Politekhnikeskaya Street, 29, Building B ORCID: 0000-0003-1342-1608 E-mail: plotnikov_dg@spbstu.ru
Платова Анастасия Романовна специалист отдела информационного обеспечения стандартизации, ФАУ «РОСДОРНИИ» Адрес: Российский дорожный научно-исследовательский институт, 125493, Россия, г. Москва, ул. Смольная, д. 2 ORCID: 0009-0006-8495-4873 E-mail: platovaar@rosdornii.ru	Platova Anastasia Romanovna Specialist, Department of Information Support for Standardization, Federal Autonomous Institution «ROSDORNII» Address: Russian Road Research Institute, 125493, Russia, Moscow, Smolnaya st., 2 ORCID: 0009-0006-8495-4873 E-mail: platovaar@rosdornii.ru

Статья получена 20.01.2026 | статья опубликована 25.03.2026

Article received 20.01.2026 | Article published 25.03.2026

УДК 621.3.078

ЭЛЕКТРОМАШИННАЯ ИМИТАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ КОМПЛЕКТОВ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ КОЛЕСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЕМ

А. Ф. Слутин**А. В. Бериллов****М. Ю. Румянцев***ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»*

Аннотация. В статье рассмотрена возможность применения гибридной имитационной технологии для испытаний комплектов тягового электрооборудования (КТЭО) современных и перспективных видов колесного электрического транспорта. Выполнено теоретическое обоснование возможности создания программно-управляемого испытательного комплекса, позволяющего имитировать в ходе стендовых испытаний работу КТЭО в реальных условиях эксплуатации транспортных средств, что значительно превышает возможности испытаний КТЭО на узкоспециализированных стендах с механоэлектрическими нагрузочными устройствами. Приведены исходная и линеаризованная системы дифференциальных уравнений, описывающих работу испытуемой и нагрузочной электрических машин, работающих совместно в составе комплекса, его структурная схема, передаточные функции и результаты моделирования системы автоматического регулирования частоты вращения электрических машин.

Ключевые слова: электромобиль, электродвижение, комплект тягового электрооборудования, испытательный стенд, нагрузочная имитационная электрическая машина, тяговый электродвигатель, система автоматического регулирования частоты вращения, структурная схема, ПИД-регулятор.

UDC 621.3.078

ELECTRIC MACHINE SIMULATION TECHNOLOGY FOR BENCH TESTING OF TRACTION ELECTRICAL EQUIPMENT SETS FOR WHEELED ELECTRIC VEHICLES

A. F. Slutin**A. V. Berilov****M. Y. Rumyantsev***NRU Moscow Power Engineering Institute*

Abstract. This article examines the applicability of hybrid simulation technology for testing traction electrical equipment sets (TEES) of current and prospective wheeled electric vehicles. A theoretical justification is presented for the feasibility of creating a software-controlled test complex capable of simulating, under bench test conditions, the operation of a TEES in real vehicle service environments — significantly extending the capabilities of TEES testing on specialised benches with electromechanical load devices. The article

presents the original and linearised systems of differential equations describing the operation of the test and load electric machines functioning jointly within the complex, together with its structural diagram, transfer functions, and simulation results for the automatic speed control system of the electric machines.

Keywords: electric vehicle, electric propulsion, traction electrical equipment set, test bench, load simulation electric machine, traction electric motor, automatic speed control system, structural diagram, PID controller.

Введение

В настоящее время одной из основных тенденций развития транспорта является все большая электрификация и переход на системы электродвижения. Это связано в том числе с появлением энергоемких и доступных на рынке электрохимических источников электрической энергии, успехами в создании бесконтактных электрических машин (ЭМ) с высокими удельными энергетическими и массогабаритными характеристиками с управлением от высокоэффективных электронных преобразователей (ЭПП), развитием цифровых систем управления. При этом указанная тенденция характерна для наземного (колесного и гусеничного), а также авиационного (электросамолеты, электродиректабля, электровертолеты и т. п.), надводного и подводного видов транспорта.

Достоинства электрифицированных транспортных средств (ТС) очевидны:

- возможность более экономичного расходования энергоресурсов, в том числе за счет простоты реализации режимов рекуперации энергии движения;
- экологичность, что особенно важно для крупных городов и мегаполисов;
- относительная простота создания беспилотных и роботизированных ТС;
- доступные информационные решения и аппаратные средства для глубокой автоматизации процессов управления ТС.

Разработка, исследование, производство, внедрение и эксплуатация мехатронных систем тягового электрооборудования ТС становятся основными задачами транспортной инженерии [1].

При этом большое значение приобретают способы и средства проведения экспериментальных исследований электрифицированных ТС в части испытаний их бортового (тягового) электрооборудования. Такие испытания должны быть достоверными по результатам и доступными по испытательному оборудованию, быстро реализуемыми во времени и экономически эффективными. Поэтому разработка новых конструкций испытательного оборудования и способов проведения экспериментов являются актуальными задачами.

Методы

Предлагаемый способ основан на электромашинной имитационной технологии [2, 3] для опытных и эксплуатируемых комплектов тягового электрооборудования (КТЭО) электрических и гибридных ТС (рис. 1), когда программа ходовых испытаний образцов ТС во многом может быть выполнена с помощью стенда, имитирующего возмущающие и управляющие воздействия, а также диссипативные и инерционные факторы, возникающие при движении транспортного средства в реальных условиях эксплуатации. Другими словами, стендовое оборудование позволяет воссоздать бортовые условия работы КТЭО.

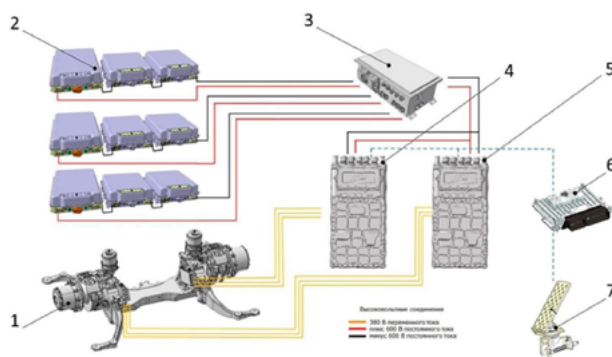


Рис. 1. Комплект тягового электропривода на примере электробуса [4]: 1 — ТЭД из моста электропортального; 2 — модуль тяговой батареи (ТБ); 3 — коробка коммутационная тягового электропривода; 4, 5 — тяговые инверторы (ТИ); 6 — электронный блок управления верхнего уровня (ЭБУВУ); 7 — педаль акселератора в кабине водителя. Источник: [4]

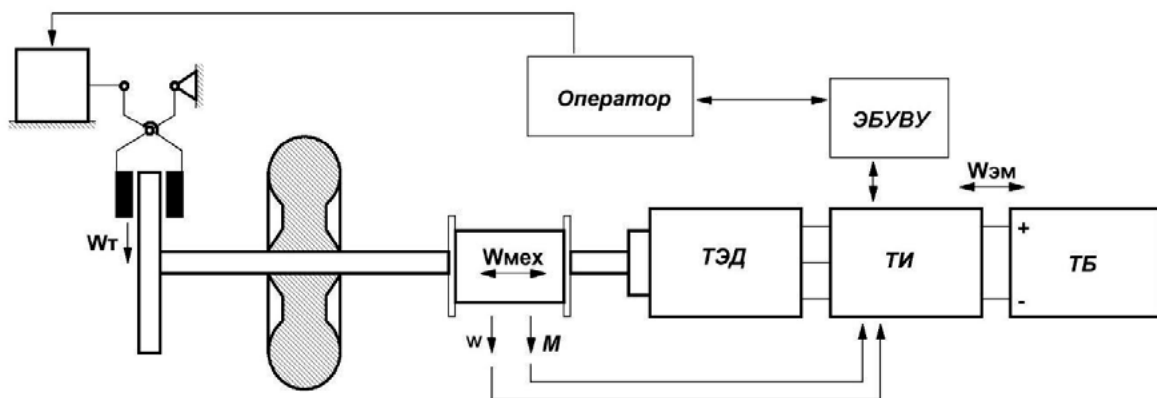
Способ реализуется через управление нагрузочной электрической машиной (НЭМ) работающей в паре с тяговым электродвигателем (ТЭД) и имитирующей условия работы КТЭО на борту ТС.

На рис. 2 показаны замещающие модели движения ТС, отражающие преобразование электромагнитной энергии ($W_{\text{ЭМ}}$) в теплоту, характеризующее внешние и внутренние силы сопротивления движению, т. е. диссипативный фактор, и обратимое преобразование этой энергии в кинетическую энергию движения ТС, т. е. инерционный фактор.

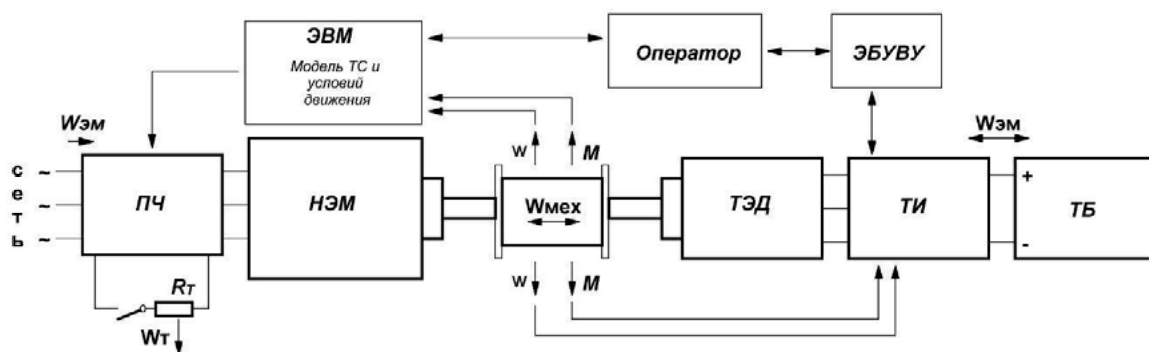
Первая модель (рис. 2а) с присоединенной массой, имитирующей инерционность ТС,

и тормозным диском, имитирующим момент сопротивления движению, используется в составе испытательных стендов сравнительно давно [5, 6]. Вторая модель (рис. 2б), с имитацией инерции и сил сопротивления движению за счет динами-

ческого управления электромагнитным моментом НЭМ, стала возможной только на современном этапе развития силовой и информационной электроники [7–9].



а)



б)

Рис. 2. Физические модели, имитирующие условия работы КТЭО ТС. Источник: авторы исследования

Алгоритм регулирования НЭМ для транспортного стенда может быть следующим:

1. при поступлении сигнала на увеличение или уменьшение силы тяги или скорости движения ТС по величине, пропорциональной этому сигналу, на основании математической модели ТС при заданном профиле пути, рассчитывается требуемое значение (t) угловой частоты вращения вала испытуемого ТЭД;
2. по отклонению измеренного датчиком частоты вращения значения фактической частоты вращения $\omega'(t)$ от расчетной (t) производится регулирование НЭМ спарки. При этом в зависимости от знака отклонения НЭМ может находиться в тормозном (генераторном) или двигательном режиме, получая питание от внешнего источника электропитания стенда.

Ниже приведена система исходных нелинейных уравнений регулируемой спарки (для ТЭД и НЭМ с независимым возбуждением, в частности от постоянных магнитов) и соответствующая ей линеаризованная система для малых отклонений переменных относительно базовой точки, например, с параметрами номинального режима.

$$L_a(i) \frac{d}{dt} i + i \cdot r = u_1(t) - e(\omega, i) \quad (1)$$

$$L_a(i) \frac{d}{dt} i + i \cdot r = u_1(t) - e(\omega, i) \quad (2)$$

$$J_{\Sigma} \frac{d}{dt} \omega = M_1 \cdot \eta(i, \omega) - W(\omega) \cdot \frac{R_k}{u \cdot \eta'} \quad (3)$$

$$m' \cdot \frac{R_k}{u} \cdot \frac{d}{dt} \omega' = M_1 \cdot \eta(i, \omega') \cdot \eta' \cdot u \cdot \frac{1}{R_k} - W(\omega') \quad (4)$$

$$\Delta(\omega) = \omega(t) - \omega'(t) \quad (5)$$

$$u_2(t) = K_{II} \cdot \Delta(\omega) + K_{II} \cdot \int_0^t \Delta(\omega) dt + K_{ID} \cdot \frac{d}{dt} \Delta(\omega) \quad (6)$$

где

$L_{(a)}(i)$ — индуктивность якорной цепи ТЭД;
 r — сопротивление якорной цепи ТЭД;
 $u_1(t)$ — входное напряжение ТЭД;
 $e(\omega, i)$ — ЭДС вращения;
 M_1 — электромагнитный (э. м.) момент испытуемого ТЭД;
 $J_{\Sigma} = J_1 + J_2$ — момент инерции роторов спарки;
 $[m]^*$ — приведенная масса ТС с учетом инерции вращающихся масс;
 ω — угловая скорость испытуемого ТЭД и спарки по результату измерения датчика частоты вращения;
 ω' — угловая скорость испытуемого ТЭД в составе ТС по результатам моделирования режима движения;
 $\eta(i, \omega)$ — КПД испытуемого ТЭД;
 η' — КПД трансмиссии ТС;
 u — передаточное число трансмиссии ТС;
 R_k — радиус качения колеса;
 W — полное сопротивление движению ТС записанное в функции угловой скорости ТЭД;
 $\Delta(\omega)$ — отклонение (ошибка) угловой скорости спарки;
 $u_2(t)$ — входное напряжение НЭМ;
 K_M — коэффициент передачи момента по току;
 K_P, K_I, K_D — коэффициенты ПИД регулятора.

Для малых отклонений переменных получим:

$$T_{11} \frac{d}{dt} \Delta i_1 + \Delta i_1 = K_{11} \cdot \left(\Delta u_1(t) - \Delta e_1 \right) \quad (7)$$

$$\Delta M_1 = K_{12} \cdot \Delta i_1 \quad (8)$$

$$\Delta M_2 = K_{22} \cdot \Delta i_2 \quad (9)$$

$$T_2 \frac{d}{dt} \Delta \omega + \Delta \omega = \pm K_{13} \cdot \Delta M_1(t) \pm K_{23} \cdot \Delta M_2(t) \quad (10)$$

$$T_2 \frac{d}{dt} \Delta \omega + \Delta \omega = \pm K_{13} \cdot \Delta M_1(t) \pm K_{23} \cdot \Delta M_2(t) \quad (11)$$

$$\Delta e_2 = K_{E2} \cdot \Delta \omega \quad (12)$$

$$T_3 \frac{d}{dt} \Delta \omega' + \Delta \omega' = K_4 \cdot \Delta M_1(t) \quad (13)$$

$$\Delta_{12} = \Delta \omega(t) - \Delta \omega'(t) \quad (14)$$

$$\Delta u_2 = K_5 \cdot \Delta_{12}(t) + K_6 \cdot \int_0^t \Delta_{12}(t) dt + K_7 \cdot \frac{d}{dt} \Delta_{12} \quad (15)$$

$$T_{21} \frac{d}{dt} \Delta i_2 + \Delta i_2 = K_{21} \cdot \left(\Delta u_2(t) - \Delta e_2 \right) \quad (16)$$

где

$[\Delta u]_1(t) = U_1 \cdot 1(t)$ — управляющее воздействие;
 $[\Delta u]_2(t)$ — регулирующее воздействие;
 K_{11}, K_{12} — коэффициенты передачи электромагнитной части ТЭД по управляющему воздействию;

K_{21}, K_{22} — коэффициенты передачи электромагнитной части НЭМ по регулирующему воздействию;
 K_{13} — коэффициент передачи ТЭД по электромагнитному моменту;
 K_{23} — коэффициент передачи НЭМ по электромагнитному моменту;
 K_4 — коэффициент передачи учитывающий конструктивные условия работы ТЭД на борту ТС;
 K_5 — коэффициент передачи пропорционального звена ПИД-регулятора;
 K_6 — коэффициент передачи интегрирующего звена ПИД-регулятора;
 K_7 — коэффициент передачи дифференцирующего звена ПИД-регулятора;
 K_{E1} — коэффициент передачи ТЭД по ЭДС вращения;
 K_{E2} — коэффициент передачи НЭМ по ЭДС вращения;
 T_{11} — электромагнитная постоянная времени ТЭД;
 T_{21} — электромагнитная постоянная времени НЭМ;
 T_2 — механическая постоянная времени «спарки»;
 T_3 — механическая постоянная времени «бортового» ТЭД» (в расчетной модели с присоединенной массой ТС).

Соответствующая структурная схема САР частоты вращения спарки приведена на рис. 3.

Передаточные функции динамических звеньев САР [10] следующие:

– электромагнитного момента испытуемого ТЭД по управляющему воздействию

$$W_1(p) = \frac{K_{11} K_{12}}{T_{11} p + 1} \quad (18)$$

– электромагнитного момента НЭМ по регулирующему воздействию

$$W_2(p) = \frac{K_1 K_2}{T_2 p + 1} \quad (19)$$

– механической части спарки по электромагнитному моменту ТЭД с НЭМ

$$W_3(p) = \frac{K_3}{T_2 p + 1} \quad (20)$$

– звена вычислителя бортового ТЭД, соответствующего задающему устройству САР ЧВ спарки, с учетом запаздывания на время расчета модели — τ .

$$W_0(p) = \frac{K_{11} K_{12}}{(T_{11} p + 1)} \frac{K_4}{(T_3 p + 1)} \frac{1}{1 + \frac{K_{11} K_{12}}{(T_{11} p + 1)} \frac{K_4}{(T_3 p + 1)} K_{E1}} e^{-p\tau} \quad (17)$$

– ПИД-регулятора по ошибке

$$W_4(p) = K_5 + \frac{K_6}{p} + K_7 p \quad (21)$$

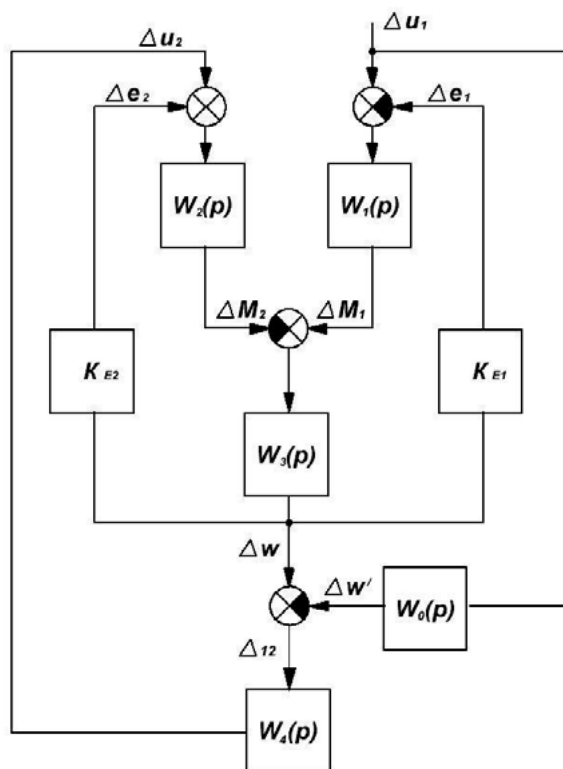


Рис. 3. Структурная схема САУ частоты вращения спарки НЭМ и ТЭД. Источник: авторы исследования

Приведенная математическая модель служит для сопоставления динамических и частотных характеристик САУ частоты вращения спарки и ее звеньев в целях предварительной оценки возможности замены физической присоединенной массы ТС на НЭМ с блоком вычислителя на основе виртуальной модели.

В частности, задача состоит в синтезе ПИД-регулятора (подборе коэффициентов передачи) при заданных физических константах ТС, с целью минимизации ошибки Δ_{12} и обеспечения необходимого качества процесса регулирования.

Результаты и обсуждение

На рис. 4 приведены графики переходных характеристик для регулируемой спарки, вычислителя бортового ТЭД (задающего устройства), ошибки регулирования Δ_{12} , а также графики моментов (токов) испытуемого ТЭД и НЭМ. В левой части рисунка показаны графики указанных характеристик при отключенном ПИД-регуляторе, справа — с регулятором.

Значения конструктивных констант ТЭД и ТС, использованных при моделировании, сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Конструктивные константы ТЭД и ТС

№ п/п	ТЭД (МПТ независимого возбуждения)			
	параметр	ед. изм.	значение	примечание
1	2	3	4	5
1	мощность номинальная	кВт	150	
2	напряжение ном.	В	500	
3	частота вращения ном.	мин ⁻¹	1800	
4	КПД в ном. режиме	-	0,92	
5	момент инерции ротора	кг·м ²	4	
6	сопротивление якоря	Ом	0,05	
ТС (электробус, троллейбус)				
	параметр	ед. изм.	значение	примечание
1	масса	кг	$1,5 \cdot 10^4$	с учетом пасс. нагрузки
2	коэффициент инерции вращающихся масс	-	1,15	
3	радиус качения колеса	м	0,54	по аналогии с троллейбусом
4	передаточное число трансмиссии	-	9,8	—//—
5	КПД механической части трансмиссии	-	0,95	—//—

Источник: авторы исследования

Заключение

По результатам математического моделирования САР частоты вращения спарки с ПИД-регулятором, для заданной ступени напряжения испытуемого ТЭД максимальная ошибка регулирования составила около 0,14%. Изменение регулируемой величины (ω) соответствует аperiодическому процессу, без признаков колебательности и динамического перерегулирования. Это указывает на устойчивость САР и возможность компенсации ошибки не только в статическом, но и в динамическом режиме. Таким образом, возможна замена присоединенной массы стендового оборудования на регулируемую НЭМ, при этом исключается необходимость в переналадке механической части оборудования для решения новых задач эксперимента, что позволит обходиться программными средствами стендового комплекса и универсальной НЭМ, вместо физической замены присоединенных масс механического оборудования и переустанавливаемых спарок ТЭД. При этом обеспечивается существенное расширение круга решаемых задач в области экспериментальных исследований КТЭО ТС, доступными средствами проведения эксперимента, в короткие сроки и экономически более выгодно. Кроме того, испытательные комплексы, оборудованные для проведения таких гибридных испытаний, могут служить обучающей площадкой для повышения квалификации персонала и проведения учебных лабораторных работ.

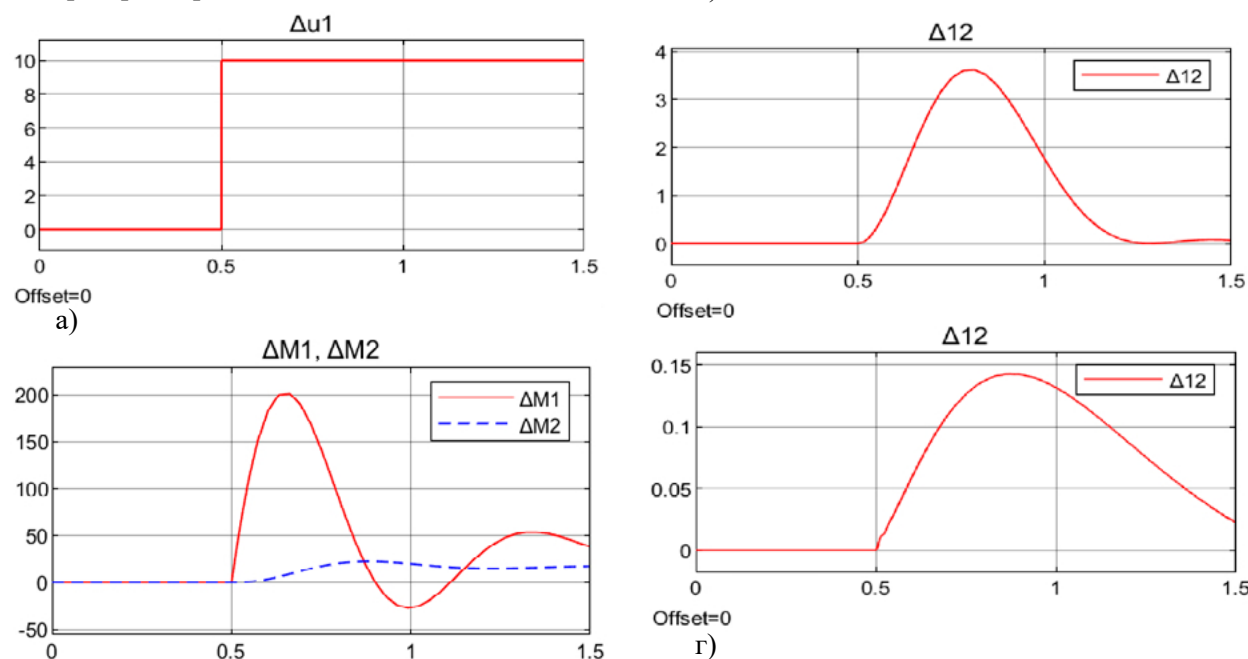


Рис. 4. Переходные характеристики САР частоты вращения спарки:
 а) приращение напряжения ТЭД, В; б) приращение электромагнитных моментов, Нм;
 в) приращение угловых скоростей, рад/с; г) ошибка регулирования, рад/с.
 Источник: авторы исследования

Список литературы

1. Слутин А. Ф., Ручкина Л. Г. Тягово-энергетическая модель и результаты расчетов режимов движения скоростного электропоезда // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте: сборник трудов научно-практической конференции с международным участием. — Москва, 20–21 октября 2021 г. — С. 386–394.
2. Бериллов А. В., Грузков Д. С., Обладович В. А. О подходе к синтезу имитационных нагрузочных устройств // Вестник Московского энергетического института. — 2007. — № 3. — С. 27–32.
3. Родионов Р. В. Тягово-энергетические характеристики привода троллейбуса и алгоритм управления тяговым асинхронным двигателем // Электротехника. — 2011. — № 12. — С. 4–9.
4. Электробус ЛиАЗ-6274 (с 2023 г.) [Электронный ресурс]. — URL: https://eltroll2.ru/elbus/Liaz_6274_2023.php (дата обращения: 10.12.2025).
5. Гущо-Малов Б. П., Эйдинов А. А., Яковлев А. И. Универсальный стенд для испытания систем электропривода транспортных машин с мотор-колёсами // Труды НАМИ. — 1974.
6. Серебряков В. В., Баулина Е. Е., Кондрашев В. И. Проектирование и изготовление стенда для имитации движения транспортного средства с приводом от электродвигателя // Известия МГТУ «МАМИ». — 2013. — № 1 (15). — Т. 1. — С. 184–191.
7. Куликов И. Технология HIL как инструмент создания автомобильных многоприводных силовых агрегатов // Известия МГТУ «МАМИ». — 2014. — № 3 (21). — Т. 1. — С. 27–34.
8. Kyslan K., Durovsky F. Dynamic Emulation of Mechanical Loads — An Approach Based on Industrial Drives' Features // Automatika. — 2013. — Vol. 54. — P. 356–363. — DOI: 10.7305/automatika.54-3.184.
9. Song Q., Liu W., Zhao W., Li Y., Ahmad M., Zhao L. Road Load Simulation Algorithms Evaluation Using a Motor-in-the-Loop Test Bench // IEEE Transportation Electrification Conference and Expo — Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). — Seogwipo, Korea, 2019. — P. 1–6. — DOI: 10.1109/ITEC-AP.2019.8903852.
10. Филиппс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью. — М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. — 616 с.

References

1. Slutin A. F., Ruchkina L. G. Tyagovo-energeticheskaya model i rezultaty raschetov rezhimov dvizheniya skorostnogo elektropoyezda [Traction-energy model and calculation results of high-speed electric train operating modes] // Innovatsionnye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte: sbornik trudov nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. — Moscow, 20–21 October 2021. — P. 386–394. (In Russ.)
2. Berilov A. V., Gruzkov D. S., Obtradovich V. A. O podkhode k sintezu imitatsionnykh nagruzochnykh ustrojstv [On the approach to the synthesis of simulation load devices] // Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta [Bulletin of Moscow Power Engineering Institute]. — 2007. — No. 3. — P. 27–32. (In Russ.)
3. Rodionov R. V. Tyagovo-energeticheskie kharakteristiki privoda trollejbusa i algoritm upravleniya tyagovym asinkhronnym dvigatelem [Traction-energy characteristics of trolleybus drive and control algorithm for traction induction motor] // Elektrotehnika [Electrical Engineering]. — 2011. — No. 12. — P. 4–9. (In Russ.)
4. Elektrobus LiAZ-6274 (s 2023 g.) [LiAZ-6274 electric bus (from 2023)]. — Available at: https://eltroll2.ru/elbus/Liaz_6274_2023.php (accessed: 10.12.2025). (In Russ.)
5. Gushcho-Malov B. P., Ejdinov A. A., Yakovlev A. I. Universalnyj stend dlya ispytaniya sistem elektroprivoda transportnykh mashin s motor-kolyosami [Universal test bench for testing electric drive systems of transport vehicles with wheel motors] // Trudy NAMI [Proceedings of NAMI]. — 1974. (In Russ.)
6. Serebryakov V. V., Baulina E. E., Kondrashev V. I. Proektirovanie i izgotovlenie stenda dlya imitatsii dvizheniya transportnogo sredstva s privodom ot elektrodvigatelya [Design and manufacture of a test bench for simulating the motion of an electrically driven vehicle] // Izvestiya MGTU MAMI [Proceedings of MSTU MAMI]. — 2013. — No. 1 (15). — Vol. 1. — P. 184–191. (In Russ.)
7. Kulikov I. Tekhnologiya HIL kak instrument sozdaniya avtomobilnykh mnogoprivodnykh silovykh agregatov [HIL technology as a tool for developing multi-drive automotive powertrains] // Izvestiya MGTU MAMI [Proceedings of MSTU MAMI]. — 2014. — No. 3 (21). — Vol. 1. — P. 27–34. (In Russ.)
8. Kyslan K., Durovsky F. Dynamic Emula-

tion of Mechanical Loads—An Approach Based on Industrial Drives' Features // *Automatika*.— 2013.— Vol. 54.— P. 356–363.— DOI: 10.7305/automatika.54–3.184.

9. Song Q., Liu W., Zhao W., Li Y., Ahmad M., Zhao L. Road Load Simulation Algorithms Evaluation Using a Motor-in-the-Loop Test Bench // *IEEE Transportation Electrification Conference*

and Expo—Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific).— Seogwipo, Korea, 2019.— P. 1–6.— DOI: 10.1109/ITEC-AP.2019.8903852.

10. Phillips C., Harbor R. *Sistemy upravleniya s obratnoj svyazyu* [Feedback Control Systems].— Moscow: Laboratoriya bazovykh znaniy Publ., 2001.— 616 p. (In Russ.)

Сведения об авторах	Information about the authors
Слутин Александр Флавиевич кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехнические комплексы автономных объектов и электрического транспорта» (ЭКАО и ЭТ) ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» Адрес: ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14 ORCID:0009–0006–7304–6706 E-mail: Slutin-AF@mpei.ru	Slutin Alexander Flavievich Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electrical Engineering Complexes of Autonomous Objects and Electric Transport (EKAO and ET), National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (NRU MPEI) Address: NRU MPEI, 14 Krasnokazarmennaya Street, Moscow, 111250, Russia ORCID: 0009–0006–7304–6706 E-mail: Slutin-AF@mpei.ru
Румянцев Михаил Юрьевич кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий кафедрой «Электротехнические комплексы автономных объектов и электрического транспорта» (ЭКАО и ЭТ) ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» Адрес: ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14 E-mail: RumyantsevMY@mpei.ru	Rumyantsev Mikhail Yuryevich Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of the Department of Electrical Engineering Complexes of Autonomous Objects and Electric Transport (EKAO and ET), National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (NRU MPEI) Address: NRU MPEI, 14 Krasnokazarmennaya Street, Moscow, 111250, Russia E-mail: RumyantsevMY@mpei.ru
Бериллов Андрей Вячеславович ведущий инженер и старший преподаватель кафедры «Электротехнические комплексы автономных объектов и электрического транспорта» (ЭКАО и ЭТ), ведущий инженер НИЛ «Автономные системы электрооборудования подвижных объектов», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» Адрес: ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14 ORCID: 0009–0001–9546–6983 E-mail: BerilovAV@mpei.ru	Berilov Andrei Vyacheslavovich Leading Engineer and Senior Lecturer, Department of Electrical Engineering Complexes of Autonomous Objects and Electric Transport (EKAO and ET); Leading Engineer, Research Laboratory of Autonomous Electrical Equipment Systems for Mobile Objects, National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (NRU MPEI) Address: NRU MPEI, 14 Krasnokazarmennaya Street, Moscow, 111250, Russia ORCID: 0009–0001–9546–6983 E-mail: BerilovAV@mpei.ru

Статья получена 25.02.2026 | статья опубликована 25.03.2026

Article received 25.02.2026 | Article published 25.03.2026

УДК 625.1:725.33(091)

КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ПРОЕКТА РЕКОНСТРУКЦИИ ТРАМВАЙНОГО ДЕПО ИМЕНИ АПАКОВА

В. П. Титов**Ю. В. Лазуткин***ГБУ «МосТрансПроект»*

Аннотация. В работе рассматриваются уникальные технологии проекта реконструкции комплекса зданий и сооружений трамвайного депо имени П. Л. Апакова в Москве — одного из старейших предприятий городского электрического транспорта, обладающего историко-культурной ценностью. Актуальность исследования обусловлена необходимостью адаптации инфраструктуры депо начала XX века к современным требованиям эксплуатации трамвайного подвижного состава, включая низкопольные вагоны. Целью работы является разработка и обоснование комплекса конструктивных решений, обеспечивающих создание современного производственно-ремонтного комплекса при сохранении исторического облика зданий и минимизации воздействия на окружающую среду. Исследование основано на результатах натурных обследований конструкций и фундаментов, инженерно-геологических изысканий, а также применении технологий информационного моделирования и расчетных комплексов для анализа напряженно-деформированного состояния конструкций. Разработан и реализован уникальный подход, включающий: усиление и частичную замену фундаментов методом инъектирования и торкретирования с сохранением исторической бутовой кладки; устройство новой пространственной рамно-связевой каркасной системы из монолитного железобетона и современных стальных профилей, интегрированной с сохраняемыми кирпичными стенами; применение навесной фасадной системы CUUBER для утепления и облицовки фасадов, воссоздающей исторический стиль; полную замену рельсошпальной решетки и инженерных систем. Реализация проекта позволила увеличить вместимость депо на 30% и более чем в два раза повысить производительность труда. Полученные результаты демонстрируют возможность адаптации исторических промышленных зданий к современным технологическим требованиям без утраты их архитектурной и культурной ценности.

Ключевые слова: реконструкция, трамвайное депо, конструктивные решения, историческое наследие, усиление фундаментов, рамно-связевой каркас, BIM-технологии, транспортная инфраструктура.

UDC 625.1:725.33(091)

STRUCTURAL DESIGN SOLUTIONS FOR THE RECONSTRUCTION PROJECT OF THE APAKOV TRAM DEPOT

V. P. Titov**Y. V. Lazutkin***SBI «MosTransProject»*

Abstract. This paper examines the unique technologies employed in the reconstruction project of the building complex of the P. L. Apakov Tram Depot in Moscow — one of the oldest urban electric transport facilities of historical and cultural significance. The study is motivated by the need to adapt the early 20th-century depot infrastructure to the modern operational requirements of tram rolling stock, including low-floor vehicles. The objective is to develop and substantiate a set of structural solutions ensuring the creation of a modern production and maintenance complex while preserving the historical appearance of the buildings and minimizing environmental impact. The research is based on the results of in-situ surveys of structures

and foundations, geotechnical investigations, and the application of Building Information Modelling (BIM) technologies and computational software for stress-strain analysis of structures. A unique approach was developed and implemented, incorporating 4 key interventions: foundation reinforcement and partial replacement through grouting and shotcreting, with the historic rubble masonry preserved; a new spatial frame-braced skeletal system of monolithic reinforced concrete and modern steel sections, fully integrated with the retained brick walls; the CUUBER ventilated façade system for thermal insulation and cladding, recreating the depot's historic architectural style; and complete replacement of the track-and-sleeper grid and all engineering systems. Project implementation increased depot capacity by 30% and more than doubled labour productivity. The results demonstrate the feasibility of adapting historic industrial buildings to contemporary technological requirements without loss of their architectural and cultural value.

Keywords: reconstruction, tram depot, structural solutions, historical heritage, foundation reinforcement, frame-braced skeletal system, BIM technologies, transport infrastructure.

Введение

История московского трамвая насчитывает более 120 лет. Первая линия электрического трамвая в Москве была открыта в 1899 году, а к 1911 году последние линии конной тяги, или конки, были полностью переведены на электрическую [1]. Для обслуживания нового вида транспорта требовались специализированные предприятия — трамвайные парки (рис. 1). Одним из таких новых парков стал Замо-

сковорецкий трамвайный парк на Шаболовке, построенный в 1909 году по проекту архитектора Михаила Николаевича Глейнинга, который в начале XX века спроектировал множество транспортных объектов столицы. Парк вмещал 200 двухосных вагонов и включал в себя административное здание, ремонтные мастерские, кузницу, котельную и жилой дом для сотрудников [2].



Рис. 1. Историческая ретроспектива трамвайной системы Москвы. Источник: авторы исследования

В 1923 году Замоскворецкому парку было присвоено имя Петра Лукича Апакова, работавшего здесь вагоновожатым. Он был одним из организаторов отрядов Красной Гвардии Замоскворецкого района, а в 1932 году все трамвайные парки Москвы были переименованы в депо. Так предприятие получило название, сохранившееся до сегодняшнего дня, — трамвайное депо имени П. Л. Апакова. К 1934 году трамвай стал доминирующим видом транспорта

в Москве: 2,6 млн человек из 4 млн жителей столицы пользовались им ежедневно [3]. В послевоенные годы депо стало испытательным полигоном трамвайной техники всесоюзного масштаба. В 1950-е годы здесь проходили испытания новых вагонов Рижского вагоностроительного завода, а в 1959 году появились первые в Москве чехословацкие трамваи модели «Татра Т2». Последний капитальный ремонт депо осуществлялся в 1960-е годы [4].

Таким образом, к началу XXI века депо имени П. Л. Апакова, оставаясь ключевым элементом транспортной системы города, столкнулось с рядом критических проблем. Анализ мирового опыта реконструкции исторических транспортных объектов, например, в Вене и Берлине, показывает, что успех таких проектов зависит от глубины проработки конструктивных решений, обеспечивающих бесшовную интеграцию нового каркаса в старые стены [5, 6]. Исходное техническое состояние зданий,

зафиксированное в отчетах об обследовании, характеризовалось как ограниченно-работоспособное и даже аварийное для отдельных элементов [7]. Фундаменты, выполненные из бутового камня и кирпича, имели локальные ослабления. Стены были поражены трещинами, а металлические конструкции перекрытий — коррозией. Прежняя тупиковая схема работы депо, действовавшая с 1909 года, была неэффективна и создавала высокую нагрузку на прилегающую уличную инфраструктуру (рис. 2).



Рис. 2. Историческое здание административного корпуса депо им. П.Л. Апакова (объект культурного наследия).
Источник: авторы исследования

Целью данного проекта стала разработка комплекса конструктивно-технологических решений, направленных на создание современного производственно-ремонтного комплекса, обеспечивающего обслуживание низкопольных трамваев «Витязь-М» и «Львенок», при безусловном сохранении исторических фасадов и несущих стен как объекта культурного наследия, а также на повышение экологической эффективности предприятия.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

- обоснован и реализован принцип бесшовной интеграции нового рамно-связевого железобетонного каркаса в сохраняемый исторический объем с кирпичными стенами начала XX века, включая усиление последних методом двустороннего торкретирования по сетке;
- разработана методика устройства фундаментной плиты и усиления существующих фундаментов методом инъектирования и торкретирования в условиях стесненной застройки и наличия карстоопасных грунтов, что обеспечило надежность основания под новые крановые нагрузки;
- применен для объекта культурного наследия комплекс устойчивых технологий, включающий укладку 4,5 км путей на эко-шпалах из пере-

работанного пластика и внедрение замкнутого цикла водопользования при мойке вагонов, что позволило количественно оценить экологический эффект реконструкции.

Методы

Проектирование осуществлялось в соответствии с действующими нормативными документами РФ (СП, ГОСТ) и техническим заданием, утвержденным ГУП «Московский метрополитен». Планирование велось согласно МРР-11.1.02–21.

Основой для принятия решений послужили данные детального технического обследования, включавшего:

- инструментальное обследование, где прочностные характеристики материалов определялись неразрушающими методами с помощью комплекса ОНИКС-2.5 и ПУЛЬСАР-2.1 и методом отрыва со скалыванием ПОС 60-МГ4.2;
- инженерно-геологические изыскания, в результате которых для определения конструкции и состояния фундаментов было выполнено 27 шурфов, 13 из них по зданию профилактория и 14 по ограждающим стенам, что позволило уточнить глубину заложения,

тип и состояние кладки фундаментов;
– на основе геодезической съемки с применением лазерного сканирования была создана точная 3D-модель существующего положения конструкций, выявившая отклонения от вертикали, деформации и погнутости элементов;

Расчет конструкций выполнялся на пространственных моделях в лицензионных программных комплексах, что соответствует требованиям к особо ответственным объектам [7].

«Лири-САПР» и SCAD Office использовались для расчета несущих элементов нового каркаса — колонн, балок, ферм с учетом их совместной работы с сохраняемыми стенами. Рассмотрены все расчетные ситуации: установившаяся (эксплуатация), переходная (строительство) и особая

Результаты и обсуждение

Разработанные и реализованные конструктивные решения можно разделить на три основные группы, соответствующие этапам реконструкции: работы по фундаментам и подземной части, усиление и надстройка каркаса, фасадные решения и инженерное обустройство.

(прогрессирующее обрушение).

PLAXIS применен для моделирования взаимодействия новой фундаментной плиты с грунтовым основанием и оценки влияния карстово-суффозионных процессов, так как участок расположен на потенциально опасной территории.

«Старт-Проф» выполнен расчет прочности и жесткости трубопроводов тепловой сети, проходящих по зданию.

Проектирование велось с использованием ТИМ-технологий. Система AutoCAD и специализированные ТИМ-решения позволили создать единую информационную модель, координировать разделы проекта (КР, АР, ИОС) и своевременно выявлять коллизии. Контроль и координация задач осуществлялись через систему Битрикс24.

Конструктивные решения по фундаментам и подземной части

Анализ шурфов показал неоднородность основания и наличие дефектов в теле фундаментов [5–7]. В связи с этим был принят ряд конструктивно-технологических мер (см. табл. 1).

Таблица 1

Основные конструктивные решения по фундаментам

№ п/п	Конструктивные элементы	Выявленная проблема	Принятое конструктивно-технологическое решение
1	2	3	4
1	ленточные фундаменты под стенами	низкая прочность раствора, наличие пустот в кладке	инъектирование цементно-песчаного раствора, усиление методом торкретирования с устройством ж/б обойм
2	столбчатые фундаменты в осях «Б/4» и др.	коррозия стальных колонн, снижение несущей способности	устройство новых монолитных ж/б фундаментов с закладными деталями для новых колонн
3	фундаментная плита в осях «С/1-Ф, 3/1–4/2»	проектная необходимость изменения планировки	забутка существующего подвала, устройство новой монолитной ж/б плиты Пм-1 (h = 200 мм, бетон В25, W6, F150) по грунту с многослойной гидроизоляцией
4	прямки и каналы	отсутствие гидроизоляции, разрушение бетона	устройство новых монолитных ж/б конструкций (прямки, коллектор для теплотрассы) с оклеечной и обмазочной гидроизоляцией

Источник: авторы исследования

Особое внимание уделено защите от грунтовых вод и блуждающих токов. Для всех железобетонных конструкций, контактирующих с грунтом, принята марка по водонепроницаемости не ниже W8, увеличен защитный слой арматуры до 40 мм и выполнена обмазочная гидроизоляция. Устройство изолирующих прокладок между рельсами и бетонными конструкциями предотвращает коррозию от блуждающих токов [8–10].

Конструктивные решения по надземной части

Конструктивная схема здания запроектирована как рамно-связевая, что обеспечивает пространственную жесткость и устойчивость при значительных пролетах до 24 м и крановых нагрузках. Колонны монолитные железобетонные сечением 400 х 400 мм и 500 х 600 мм из бетона класса В30, что позволило создать жесткое сопряжение с фундаментами и обеспечить устойчивость здания. В несущих конструкциях для перекрытия больших пролетов применены стальные трапециевидные фермы пролетом до 24 м и сварные двутавровые

балки пролетом до 18,4 м. Элементы ферм выполнены из гнутосварных профилей, балки — из стали марок С245, С345. В основу положен принцип максимального сохранения исторических несущих стен. Стены в осях «3/1–4/2, С/1–Ф» с категорией ограниченно-работоспособного состояния были

сохранены и усилены. Для усиления стен толщиной 700–820 мм применено двустороннее торкретирование бетоном В25 по сварной сетке толщиной 70 мм. Трещины шириной более 0,3 мм заделаны путем нагнетания цементно-песчаного раствора (рис. 3).



Рис. 3. Фрагмент усиления кирпичной кладки фасада в осях С/1 / 4/2–3/1.
Источник: составлено авторами на основе проектной документации

Вновь возводимые участки стен выполнены из сэндвич-панелей толщиной 150 мм с негорючим утеплителем, что соответствует современным требованиям теплозащиты. В зоне опирания новых металлических балок на сохраняемые кирпичные стены устроены монолитные железобетонные пояса ($h \geq 250$ мм) для равномерного распределения нагрузки (рис. 4). Фасадные реше-

ния и инженерное обустройство. Для сохранения исторического облика была применена навесная фасадная система CUUBER, которая позволила: выполнить эффективное утепление фасадов минераловатными плитами; создать вентилируемый зазор; выполнить облицовку фасадов клинкерным кирпичом в цветах и стилистике исторического облика депо [11–13].

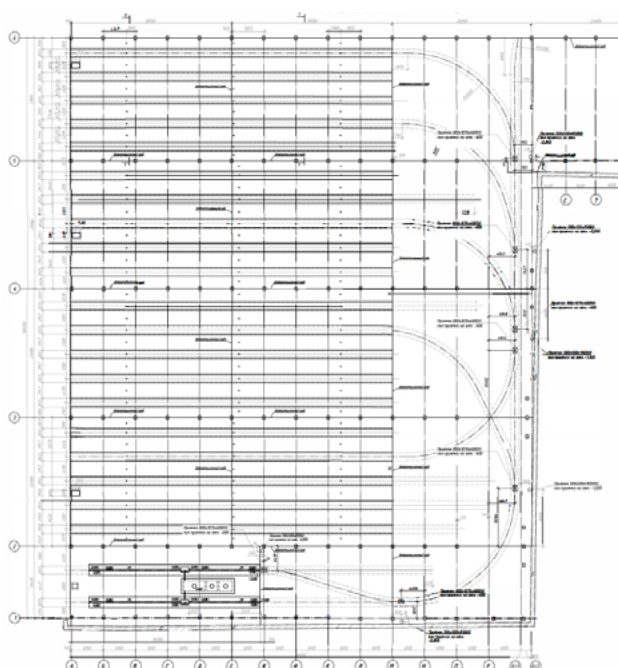


Рис. 4. Фрагмент плана основания здания депо на отметке 0.00.
Источник: составлено авторами на основе проектной документации

Все технологические процессы внутри депо пересмотрены. Установлены новые подвесные краны, что позволило организовать эффективную логистику. Внедрение сквозной круговой системы движения оптимизировало производственные

процессы. Модернизация трамвайных путей, замена рельсошпальной решетки на современное полотно и установка очистных сооружений для ливневых стоков соответствуют целям устойчивого развития [14–16].



Рис. 5. Реконструкция трамвайного депо им. П.Л. Апакова — уникальный проект с применением устойчивых технологий. Источник: авторы исследования

Реализация описанных конструктивных и технологических решений привела к значительным положительным результатам. Экологический эффект достигнут за счет использования современных материалов — композитных шпал из переработанного сырья, а также замкнутого цикла водопользования при мойке вагонов [17]

(рис. 5). Вместимость депо увеличилась на 30%, что напрямую связано с оптимизацией внутреннего пространства и путевого развития. Рост производительности труда более чем в два раза стал следствием внедрения современного кранового оборудования и эффективной логистики [18–20].

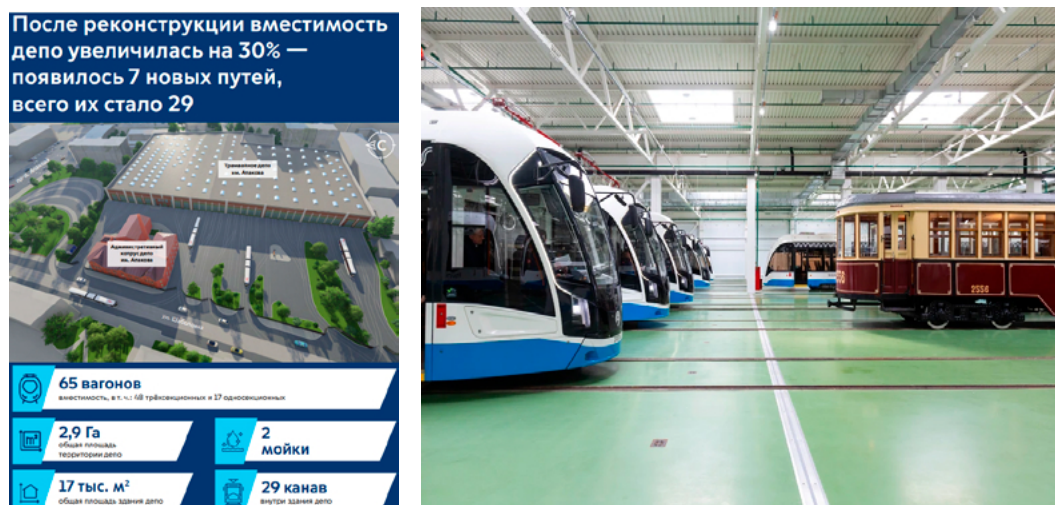


Рис. 6. Перспектива объекта (слева) и вид внутри сооружения (справа). Источник: авторы исследования

Заключение

1. Разработанный комплекс конструктивных решений позволил успешно решить задачу полной технической модернизации исторического трамвайного депо. Применение методов усиления фундаментов, инъектирования, торкретирования и устройства новых фундаментных плит обеспечило надежность основания для нового высоконагруженного каркаса.
2. Интеграция нового рамно-связевого каркаса из монолитного железобетона и современных стальных конструкций с сохраняемыми кирпичными стенами, усиленными железобетонными обоями и поясами, доказала свою эффективность для создания значительных пролетов до 24 м и восприятия крановых нагрузок.
3. Применение BIM-технологий и современных расчетных комплексов на всех этапах — от обследования до разработки рабочей документации — позволило обеспечить высокую точность проектных решений и скоординировать работу всех разделов проекта.
4. Реализованные конструктивные решения в совокупности с новыми технологическими процессами (сквозная круговая система, современное крановое оборудование) привели к увеличению вместимости депо на 30% и росту производительности труда более чем в два раза, подтвердив экономическую эффективность проекта.
5. Опыт реконструкции депо им. П. Л. Апакова демонстрирует воспроизводимую модель модернизации объектов исторического транспортного наследия, позволяющую адаптировать их к современным требованиям без утраты архитектурной идентичности и с минимизацией воздействия на окружающую среду.
6. На национальном конкурсе профессионального проектного управления в сфере устойчивого развития GPM Awards Russia 2025 в номинации «Проекты» реализованный проект реконструкции комплекса зданий и сооружений трамвайного депо имени П. Л. Апакова в Москве — одного из старейших предприятий городского электротранспорта, имеющего особую историко-культурную ценность, — удостоен диплома II степени.

Список литературы

1. Титов В. П., Мирзоян А. К., Устюжанина Е. В. Прогнозирование городских межрайонных транспортных потоков на основе агент-ориентированного подхода // Экономика и математические методы. — 2026. — Т. 62. — № 1. — С. 91–103. — DOI: 10.7868/S3034617726010078.
2. Кирсанов А. И., Розалиев В. В. Трамвайное депо имени П. Л. Апакова: к 95-летию со дня основания. — М.: [б. и.], 2004. — 164 с.
3. Лопатин А. С., Грибов М. В. Дорогу трамваю! // Автотранспортное предприятие. — 2014. — № 1. — С. 19–20.
4. Галанов В. А. Городской общественный транспорт: ценность комфорта // Московский транспорт. Наука и проектирование. — 2025. — № 4(4). — С. 71–78.
5. Федоров В. С., Лазуткин Ю. В., Купчикова Н. В. Планирование эксперимента по оценке влияния комплексности сочетания динамических воздействий от наземного и подземного транспорта // Строительство и реконструкция. — 2025. — № 4(120). — С. 71–81. — DOI: 10.33979/2073-7416-2025-120-4-71-81.
6. Купчикова Н. В., Таркин А. С., Купчиков Е. Е. Концепция управления экспертизой геоподосновы, оснований и фундаментов на всех стадиях жизненного цикла // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. — 2022. — № 1(39). — С. 101–104. — DOI: 10.52684/2312-3702-2022-39-1-101-104.
7. Kupchikova N. V. Numerical researches of the work of the pile with end spherical broadening as part of the pile group // Building and Reconstruction. — 2019. — No. 6(86). — P. 3–9. — DOI: 10.33979/2073-7416-2019-86-6-3-9.
8. Золина Т. В., Купчикова Н. В. Исследование влияния вибрационных воздействий от автотранспорта на состояние конструкций фундамента жилого здания // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. — 2019. — № 3(29). — С. 24–29.
9. Купчикова Н. В. Экспериментальные исследования по закреплению слабых грунтов под фундаментами физико-химическими методами с применением добавок-пластификаторов // Вестник гражданских инженеров. — 2014. — № 3(44). — С. 123–132.
10. Колчунов В. И., Скобелева Е. А., Купчикова Н. В. Сравнительный анализ уровня реализации функции города «жизнеобеспечение» в центральном и южном федеральных округах РФ // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. — 2014. — № 1(5). — С. 22–26.

11. Ануфриев Д. П., Купчикова Н. В. Эффективные строительные конструкции и технологии на Каспийском инновационном форуме-2009 // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. — 2009. — № 5(124). — С. 46–48.
12. Золина Т. В., Рекунов С. С. Графоаналитическое моделирование и оценка эффективности транспортно-планировочных решений в условиях линейно-вытянутой городской структуры (на примере г. Волгограда) // Московский транспорт. Наука и проектирование. — 2025. — № 3(3). — С. 37–46.
13. Лазуткин Ю. В. Результаты эксперимента по оценке влияния комплексности сочетания динамических воздействий от наземного и подземного транспорта // Московский транспорт. Наука и проектирование. — 2025. — № 2(2). — С. 40–50.
14. Королев В. В., Шишкина И. В., Князев С. С. Новые конструкции пути рельсошпальной решетки для наземного электрического рельсового транспорта и метрополитена // Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта. — 2017. — № 13. — С. 78–84.
15. Червотенко Е. Э., Калинина А. Р., Король Р. Г., Дороничев А. В. Транспортная инфраструктура: учебное пособие: в 2 ч. — Хабаровск: Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 2018. — 78 с.
16. Амельчаков И. Ф., Озеров И. Н., Александров А. Н. [и др.] Транспортная система России. — Белгород: Белгородский юридический институт

МВД России им. И. Д. Путилина, 2018. — 76 с. — ISBN978–5–91776–215–9.

17. Патент № 2264312 С1 Российская Федерация, МПК В60S3/04, В08B3/02. Способ мойки наружной поверхности пассажирских вагонов и устройство для его реализации: № 2004110270/12: заявл. 05.04.2004: опубл. 20.11.2005 / В. М. Смолянов, А. В. Журавлев, Д. В. Новосельцев [и др.]; заявитель ООО «Чистые технологии».

18. Михневич И. М. Реорганизация трамвайных маршрутов Санкт-Петербурга (на примере трамвайного парка № 8) // Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых: материалы VIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Омск, 25–26 апреля 2024 года. — Омск: СибАДИ, 2024.

19. Торопыгин П. А., Таранов И. Н., Петрищев С. А. Системы управления вспомогательными электроприводами на трамвайных вагонах // Электротехника. — 2010. — № 4. — С. 29–33.

20. Современные экономические проблемы развития и эксплуатации транспортной инфраструктуры: сборник трудов III Международной научно-практической конференции, Москва, 23 ноября 2022 года / под ред. Е. А. Ступниковой, А. Д. Разуваева. — М.: Индивидуальный предприниматель Сафронов Р. А., 2022. — 151 с. — ISBN978–5–6044050–6–2.

References

1. Titov V. P., Mirzoyan A. K., Ustyuzhanina E. V. Prognozirovanie gorodskikh mezhrajonnykh transportnykh potokov na osnove agent-orientirovannogo podkhoda [Forecasting urban inter-district transport flows based on an agent-oriented approach] // Ekonomika i matematicheskie metody [Economics and Mathematical Methods]. — 2026. — Vol. 62. — No. 1. — P. 91–103. — DOI: 10.7868/S3034617726010078. (In Russ.)
2. Kirsanov A. I., Rozaliev V. V. Tramvajnoe depo imeni P. L. Apakova: k 95-letiyu so dnya osnovaniya [The P. L. Apakov Tram Depot: on the 95th anniversary of its founding]. — Moscow, [s.n.], 2004. — 164 p. (In Russ.)
3. Lopatin A. S., Gribov M. V. Dorogu tramvayu! [Make way for the tram!] // Avtotransportnoe predpriyatie [Motor Transport Enterprise]. — 2014. — No. 1. — P. 19–20. (In Russ.)
4. Galanov V. A. Gorodskoj obshchestvennyj transport: tsennost komforta [Urban public transport: the value of comfort] // Moskovskij transport. Nauka

i proektirovanie [Moscow Transport. Science and Design]. — 2025. — No. 4 (4). — P. 71–78. (In Russ.)

5. Fedorov V. S., Lazutkin Yu. V., Kupchikova N. V. Planirovanie eksperimenta po otsenke vliyaniya kompleksnosti sochetaniya dinamicheskikh vozdeystvij ot nazemnogo i podzemnogo transporta [Experiment planning for assessment of the combined dynamic impact from surface and underground transport] // Stroitelstvo i rekonstruktsiya [Construction and Reconstruction]. — 2025. — No. 4 (120). — P. 71–81. — DOI: 10.33979/2073–7416–2025–120–4–71–81. (In Russ.)

6. Kupchikova N. V., Tarkin A. S., Kupchikov E. E. Kontseptsiya upravleniya ekspertizoj geopodosovy, osnovanij i fundamentov na vseh stadiyakh zhiznennogo tsikla [Concept of expert assessment management of geotechnical base, subsoil and foundations at all life cycle stages] // Inzhenerno-stroitelnyj vestnik Prikaspiya [Engineering and Construction Bulletin of the

Caspian Region].— 2022.— No. 1 (39).— P. 101–104.— DOI: 10.52684/2312–3702–2022–39–1–101–104. (In Russ.)

7. Kupchikova N. V. Numerical researches of the work of the pile with end spherical broadening as part of the pile group // Building and Reconstruction.— 2019.— No. 6 (86).— P. 3–9.— DOI: 10.33979/2073–7416–2019–86–6–3–9.

8. Zolina T. V., Kupchikova N. V. Issledovanie vliyaniya vibratsionnykh vozdeystviy ot avtotransporta na sostoyanie konstruksij fundamenta zhilogo zdaniya [Study of the effect of vibration impacts from road traffic on residential building foundation structures] // Inzhenerno-stroitelnyy vestnik Prikaspiya [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region].— 2019.— No. 3 (29).— P. 24–29. (In Russ.)

9. Kupchikova N. V. Eksperimentalnye issledovaniya po zakrepleniyu slabykh gruntov pod fundamentami fiziko-khimicheskimi metodami s primeneniem dobavok-plastifikatorov [Experimental studies on stabilisation of weak soils under foundations using physicochemical methods with plasticiser additives] // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers].— 2014.— No. 3 (44).— P. 123–132. (In Russ.)

10. Kolchunov V. I., Skobeleva E. A., Kupchikova N. V. Sravnitelnyy analiz urovnya realizatsii funktsii goroda «zhizneobespechenie» v tsentralnom i yuzhnom federalnykh okrugakh RF [Comparative analysis of the implementation level of the urban life-support function in the Central and Southern Federal Districts of the Russian Federation] // Biosfernaya sovместimost: chelovek, region, tekhnologii [Biospheric Compatibility: Man, Region, Technologies].— 2014.— No. 1 (5).— P. 22–26. (In Russ.)

11. Anufriev D. P., Kupchikova N. V. Effektivnye stroitelnye konstruksii i tekhnologii na Kaspijskom innovatsionnom forume-2009 [Effective building structures and technologies at the 2009 Caspian Innovation Forum] // Stroitelnye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka [Construction Materials, Equipment, Technologies of the 21st Century].— 2009.— No. 5 (124).— P. 46–48. (In Russ.)

12. Zolina T. V., Rekunov S. S. Grafoanaliticheskoe modelirovanie i otsenka effektivnosti transportno-planirovochnykh reshenij v usloviyakh linejno-vyvanutoj gorodskoj struktury (na primere g. Volgograda) [Graphoanalytical modelling and evaluation of transport planning solutions in a linearly extended urban structure (the case of Volgograd)] // Moskovskij transport. Nauka i proektirovanie [Moscow Transport. Science and Design].— 2025.—

No. 3 (3).— P. 37–46. (In Russ.)

13. Lazutkin Yu. V. Rezultaty eksperimenta po otsenke vliyaniya kompleksnosti sochetaniya dinamicheskikh vozdeystviy ot nazemnogo i podzemnogo transporta [Results of the experiment assessing the combined dynamic impact from surface and underground transport] // Moskovskij transport. Nauka i proektirovanie [Moscow Transport. Science and Design].— 2025.— No. 2 (2).— P. 40–50. (In Russ.)

14. Korolev V. V., Shishkina I. V., Knyazev S. S. Novye konstruksii puti relsoshpalnoj reshetki dlya nazemnogo elektricheskogo relsovogo transporta i metropolitena [New track-and-sleeper grid structures for surface electric rail transport and metro] // Sovremennye problemy sovershenstvovaniya raboty zheleznodorozhnogo transporta [Modern Problems of Railway Transport Improvement].— 2017.— No. 13.— P. 78–84. (In Russ.)

15. Chervotenko E. E., Kalinina A. R., Korol R. G., Doronichev A. V. Transportnaya infrastruktura: uchebnoe posobie: v 2 ch. [Transport Infrastructure: textbook in 2 parts].— Khabarovsk: Far Eastern State Transport University Press, 2018.— 78 p. (In Russ.)

16. Amelchakov I. F., Ozerov I. N., Aleksandrov A. N. et al. Transportnaya sistema Rossii [The Transport System of Russia].— Belgorod: Belgorod Law Institute of the MIA of Russia named after I. D. Putilin Publ., 2018.— 76 p.— ISBN978–5–91776–215–9. (In Russ.)

17. Smolyanov V. M., Zhuravlev A. V., Novoseltsev D. V. et al. Sposob mojki vneshnej poverkhnosti passazhirskikh vagonov i ustrojstvo dlya ego realizatsii [Method of washing the external surface of passenger carriages and a device for its implementation].— Patent RF No. 2264312 C1.— IPC B60S3/04, B08B3/02.— Filed 05.04.2004.— Publ. 20.11.2005.— Applicant: ООО «Chistyie tekhnologii». (In Russ.)

18. Mikhnevich I. M. Reorganizatsiya tramvajnykh marshrutov Sankt-Peterburga (na primere tramvajnogo parka No. 8) [Reorganisation of tram routes in Saint Petersburg (the case of Tram Depot No. 8)] // Fundamentalnye i prikladnye issledovaniya molodykh uchenykh: materialy VIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh.— Omsk, 25–26 April 2024.— Omsk: SibADI Publ., 2024. (In Russ.)

19. Toropyghin P. A., Taranov I. N., Petrishchev S. A. Sistemy upravleniya vspomogatel'nyimi elektroprivodami na tramvajnykh vagonakh [Control systems for auxiliary electric drives on tram cars] // Elektrotehnika [Electrical

Engineering].— 2010.—No. 4.—P. 29–33. (In Russ.)
 20. Stupnikova E. A., Razuvaev A. D. (eds.)
 Sovremennye ekonomicheskie problemy razvitiya
 i ekspluatatsii transportnoj infrastruktury: sbornik
 trudov III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy
 konferentsii [Contemporary Economic Problems of

Transport Infrastructure Development and Operation:
 Proceedings of the III International Scientific and
 Practical Conference].— Moscow, 23 November
 2022.— Moscow: IP Safronov R. A. Publ., 2022.—
 151 p.— ISBN978–5–6044050–6–2. (In Russ.)

Сведения об авторах	Information about the authors
Титов Владимир Павлович генеральный директор ГБУ «МосТрансПроект» Адрес: ГБУ «МосТрансПроект», 101000, г. Москва, Потаповский переулок, д. 3, стр. 1 ORCID: 0009–0006–5011–6898 E-mail: titovvp@mtp.mos.ru	Titov Vladimir Pavlovich Director General of the SBI MosTransProject Address: GBU MosTransProject, 3/1 Potapovsky Lane, Moscow, 101000, Russia ORCID: 0009–0006–5011–6898 E-mail: titovvp@mtp.mos.ru
Лазуткин Юрий Викторович заместитель директора ГБУ «МосТрансПроект» Адрес: ГБУ «МосТрансПроект», 101000, г. Москва, Потаповский переулок, д. 3, стр. 1 ORCID: 0009–0006–0564–3912 E-mail: LazutkinYV@mtp.mos.ru	Lazutkin Yuri Viktorovich Deputy Director of the SBI MosTransProject Address: GBU MosTransProject, 3/1 Potapovsky Lane, Moscow, 101000, Russia ORCID: 0009–0006–0564–3912 E-mail: LazutkinYV@mtp.mos.ru

Статья получена 26.01.2026 | статья опубликована 25.03.2026

Article received 26.01.2026 | Article published 25.03.2026

УДК 69.032.2:347.45/.47:656(470–25)

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ПРАВОВЫМИ РИСКАМИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВЫСОТНЫХ ОБЪЕКТОВ В СОСТАВЕ ТРАНСПОРТНО- ПЕРЕСАДОЧНЫХ УЗЛОВ

Т. В. Золина**Ю. А. Болдырева***ГБОУ АО «Астраханский государственный архитектурно-строительный университет»***Н. В. Купчикова***ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (РУТ МИИТ)»*

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы управления правовыми рисками на этапе проектирования высотных объектов, входящих в состав транспортно-пересадочных узлов (ТПУ) города Москвы. Актуальность исследования обусловлена усложнением архитектурно-строительных решений таких объектов и ужесточением требований к прохождению государственной экспертизы проектной документации. Цель работы — разработка модели прогнозирования и минимизации правовых рисков, возникающих при согласовании проектов высотных зданий в составе ТПУ. Методология исследования базируется на системном анализе нормативно-правовой базы, статистической обработке данных экспертных заключений и имитационном моделировании процессов взаимодействия участников инвестиционно-строительного проекта. В результате выявлена количественная зависимость между сложностью конструктивной системы здания (рамные, связевые, ствольные, аутригерные) и интенсивностью экспертных запросов, что позволило построить матрицу вероятности получения отрицательного заключения Московской государственной экспертизы. Предложена структурно-функциональная модель управления юридическим сопровождением, интегрирующая проектную и правовую деятельность. Научная новизна заключается в установлении корреляции «конструктивное решение — правовой риск» и создании инструментария для ее учета на ранних стадиях проектирования. Практическая значимость работы состоит в возможности снижения сроков и стоимости реализации проектов высотных объектов транспортной инфраструктуры за счет проактивного управления рисками.

Ключевые слова: транспортно-пересадочный узел, ТПУ, высотное здание, правовые риски, государственная экспертиза, конструктивная система, проектирование, управление рисками.

UDC 69.032.2:347.45/.47:656(470–25)

MODELLING LEGAL RISK MANAGEMENT IN THE DESIGN OF HIGH-RISE BUILDINGS WITHIN TRANSPORT INTERCHANGE HUBS

T. V. Zolina**Y. A. Boldyreva***Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering (ASUACE)***N. V. Kupchikova***Russian University of Transport (RUT MIIT)*

Abstract. This article addresses legal risk management at the design stage of high-rise building that form part of transport interchange hubs (TIHs) in Moscow. The relevance of the study stems from the increasing complexity of architectural and structural design solutions for such facilities and the tightening requirements for state expert review of project documentation. The aim of the work is to develop a model for forecasting and minimising legal risks arising during the approval of high-rise building projects within TIHs. The research methodology is based on a systematic analysis of the regulatory framework, statistical processing of expert review conclusions, and simulation modelling of the interaction processes among participants in investment and construction projects. The study establishes a quantitative relationship between the complexity of a building's structural system (frame, braced, core, and outrigger) and the intensity of expert queries, which enabled the construction of a probability matrix for predicting negative conclusions from the Moscow State Expert Review authority. A structural-functional model of legal support management is proposed, integrating design and legal activities. The scientific novelty lies in establishing the correlation between structural solution and legal risk, and in creating tools for incorporating this correlation at the early stages of design. The practical significance of the work consists in the possibility of reducing the timelines and costs of high-rise transport infrastructure projects through proactive risk management.

Keywords: transport interchange hub, TIH, high-rise building, legal risks, state expert review, structural system, design, risk management.

Введение

Современное развитие транспортной инфраструктуры мегаполисов, в частности Москвы, характеризуется интеграцией объектов капитального строительства различного функционального назначения в единые транспортно-пересадочные узлы. Согласно Генеральному плану города Москвы и программе развития Московского транспортного узла, одним из приоритетных направлений является создание многофункциональных ТПУ, включающих наряду с транспортно-логистической составляющей офисные, торговые и гостиничные комплексы, зачастую реализуемые в высотном исполнении более 75–100 м. Такие объекты, например, проектируемые в составе ТПУ «Деловой центр», «Савеловская», «Рижская», а также в зонах приаэродромных территорий (Внуково, Шереметьево), относятся к категории уникальных и особо опасных (ст. 48.1 Градостроительного кодекса РФ), что предъявляет повышенные требования к их проектированию, экспертизе и юридическому сопровождению [1].

Проблема управления правовыми рисками при реализации инвестиционно-строительных проектов (ИСП) рассматривается в трудах Корнева А. В., Тихомирова Ю. А., Попондопуло В. Ф. и др. [1–3]. Однако существующие подходы, как правило, сосредоточены на договорной работе и комплаенс-процедурах, не учитывая технологическую специфику объекта — его конструктивную систему, которая является первичным источником большинства замечаний экспертных органов. В то же время направления исследований прямо указывают на необходимость совершенствования методов проектирования транс-

портных сооружений с учетом взаимосвязей между конструктивными решениями, качеством проектирования и рисками, включая правовые и экологические [4].

Цель исследования — разработать научно обоснованную модель управления правовыми рисками на этапе проектирования высотных объектов в составе ТПУ, позволяющую прогнозировать вероятность негативных исходов государственной экспертизы и своевременно принимать управленческие решения.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Провести анализ влияния типа конструктивной системы высотного здания на сложность его юридического сопровождения при прохождении государственной экспертизы в Московской государственной экспертизе (МГЭ).
2. Разработать структурно-функциональную модель взаимодействия проектных и юридических подразделений, обеспечивающую снижение правовых рисков.
3. Предложить количественный инструментарий — матрицу рисков для оценки вероятности получения отрицательного заключения экспертизы в зависимости от качества проектной документации и сложности конструктивного решения.

Новизна полученных результатов состоит в следующем:

— впервые установлены и количественно описаны корреляционные зависимости между типом

конструктивной системы высотного здания — рамной, связевой, ствольной, аутригерной — и интенсивностью правовых рисков, то есть количеством экспертных запросов, выраженных через коэффициент сложности K_c ;

- разработана оригинальная двухфакторная матрица прогноза вероятности отрицательного заключения государственной экспертизы, учитывающая как качество проектной документации, так и сложность конструктивного решения,

Методы

Исследование базируется на комплексной методике, включающей:

- системный анализ нормативно-правовых актов (Градостроительный кодекс РФ, постановления Правительства РФ, региональные нормативы г. Москвы [5–7]);
- статистический анализ данных о прохождении экспертизы проектов высотных зданий в Москве на примере башен «Меркурий Сити Тауэр», «Федерация», бизнес-центров и гостиниц высотой 90–180 м;
- методы теории рисков и имитационного моделирования процессов взаимодействия участников ИСП;

что позволяет перейти от реактивного к проактивному управлению рисками;

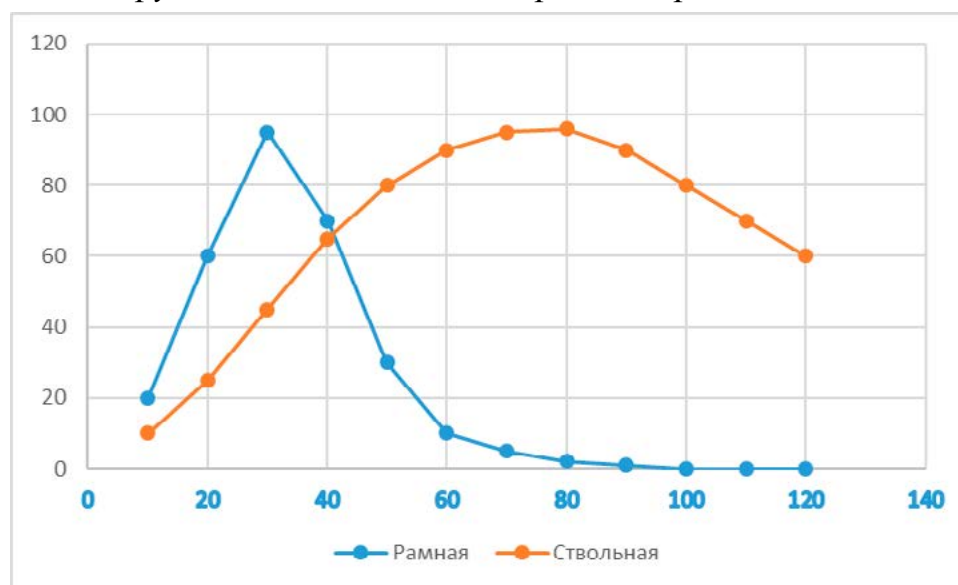
- предложена структурно-функциональной модели управления юридическим сопровождением, интегрирующей проектные и правовые подразделения на всех этапах проектной стадии, что минимизирует временные и финансовые потери при реализации уникальных проектов транспортной инфраструктуры.

- графоаналитическое моделирование конструктивных систем с определением коэффициента сложности K_c на основе физических принципов работы несущего остова.

Для количественной оценки зависимости между конструктивной системой и интенсивностью экспертных запросов введен коэффициент сложности K_c , отражающий относительное увеличение количества замечаний и запросов со стороны МГЭ по сравнению с простейшей рамной системой ($K_c=1$). Значения K_c получены экспертным путем на основе анализа реальных проектов и данных МГЭ.

Результаты и обсуждение

1. Влияние конструктивной системы на правовые риски



Ключевые точки:

25–30 этажей — пик эффективности рамных систем

60–80 этажей — оптимальный диапазон для ствольных систем

Пояснение к осям:

X — высота здания (этажи);

Y — комплексный показатель эффективности (%)

(жесткость/масса $\times$ технологичность/стоимость)

Рис. 1. Сравнительный анализ диапазонов эффективности основных систем несущего остова.

Источник: авторы исследования

Эволюция конструктивных систем и ее влияние на экспертизу прослеживаются через выбор конструктивной системы высотного здания, его этажности, и условиями среды [8–10]. Эффективность различных систем неравномерна (рис. 1), что влечет за собой существенные различия в подходах к их проектированию и, как следствие, экспертизе.

Основные типы конструктивных систем и связанные с ними вызовы при экспертизе можно систематизировать следующим образом:

- рамные, связевые и рамно-связевые;
- ствольные или ядерные;
- ствольные системы с аутригерами и мегаколоннами.

Рамные системы применяются для зданий малой и средней этажности до 25–30 этажей. Их относительная простота обуславливает минимальное количество запросов от экспертизы, фокусирующихся в основном на формальных требованиях и сметной стоимости.

Связевые и рамно-связевые системы исполь-

зуются в диапазоне 30–75 этажей. Рост сложности расчетов, например, ветровые и сейсмические нагрузки, узлы сопряжений, приводит к увеличению количества экспертных запросов в 2–4 раза по сравнению с рамными системами.

Ствольные или ядерные системы оптимальны для зданий высотой 75–100 этажей. Экспертиза концентрируется на проверке расчетов ядра на опрокидывающий момент, решений по пожарной безопасности шахт, вопросах ползучести бетона. Интенсивность запросов высока.

Ствольные системы с аутригерами и мегаколоннами применяются в уникальных зданиях свыше 100 этажей. Наибольшую сложность для экспертов представляют расчеты работы аутригерных узлов, компенсаторов деформаций, демпфирующих систем и мегаконструкций. Количество запросов максимально и может достигать нескольких десятков. Количественная зависимость интенсивности экспертного внимания от сложности конструктивной системы представлена в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость интенсивности экспертных запросов от сложности конструктивной системы

№ п/п	Конструктивная система по возрастанию сложности	Коэффициент сложности K_c	Среднее количество запросов от экспертизы	Основные темы запросов
1	2	3	4	5
1	Рамная система каркасная, до 25 этажей	1,0	3–5	Соответствие ГПЗУ, сметная стоимость, формальные несоответствия
2	Связевая система до 50 этажей	2,5	8–12	Узлы сопряжений, ветровые нагрузки, пожарные требования
3	Рамно-связевая система 50–75 этажей	4,0	15–20	Совместная работа элементов, нелинейные расчеты, сейсмика
4	Ствольная система 75–100 этажей	6,5	25–35	Расчеты ядра на опрокидывающий момент, пожарная безопасность шахт, ползучесть бетона
5	Ствольная с аутригерами 100+ этажей	9,0	40–50	Работа аутригерных узлов, компенсаторы деформаций, демпфирование
6	Система с мегаколоннами 150+ этажей, уникальные	10,0	60–80	Мегаузлы, последовательность монтажа, усталостные явления

Источник: авторы исследования

В рамках исследования сформирована гипотеза: с ростом сложности конструкции, переходом от рамных к ствольным и аутригерным системам, экспертное сообщество требует больше детальных инженерных обоснований, что выражается в значительном увеличении количества запросов и глубины проверки [11–13].

Анализ эволюции конструктивных систем высотных зданий показал, что с ростом этажности

неизбежен переход от рамных систем, эффективных до 30 этажей, к более жестким — связевым, ствольным и, для сверхвысотных объектов 100+ этажей, к ствольным системам с аутригерами. Каждый такой переход сопровождается резким увеличением сложности расчетов (ветровые и сейсмические нагрузки, работа узлов, демпфирование) и, как следствие, ростом числа запросов от экспертизы [15–17].

Установлено, что для ствольной системы с аутригерами, характерной для высотных доминант ТПУ, коэффициент сложности K_c достигает 9,0, а количество запросов возрастает до 40–50 против 3–5 для рамной системы (табл. 1). Каждый запрос требует юридического сопровождения: анализа замечаний, подготовки

обоснований, взаимодействия с экспертами, что существенно увеличивает сроки и стоимость проектных работ. Полученная зависимость соответствует п. 14 паспорта специальности 2.1.8 — разработка методов математического моделирования для оценки технических и экологических рисков.

2. Модель управления правовыми рисками на этапе проектирования

Для системного снижения выявленных рисков предложена структурно-функциональная модель (рис. 1), интегрирующая проектную и юридическую деятельность на всех подэтапах проектной стадии от выдачи задания на проектирование до получения положительного заключения МГЭ [14–15].

Модель включает:

1. «Блок предварительной правовой экспертизы» концептуальных решений (анализ ГПЗУ, ПЗЗ, технических условий на присоединение к инженерным сетям). Это соответствует п. 1 и 5 паспорта 2.1.8 — обоснование размещения транспортных сооружений с учетом требований безопасности и нормативов.
2. «Блок регламентации взаимодействия» —

разработка внутренних чек-листов для проверки разделов ПД (конструктивные решения, инженерные системы) на соответствие нормам, адаптированных под конкретный тип конструктивной системы.

3. «Блок сопровождения экспертизы» — формализованный алгоритм действий при поступлении запросов от МГЭ, включающий классификацию замечаний (критические, существенные, формальные) и матрицу ответственности участников (ГИП, юрист, расчетчик).
4. «Блок управления рисками» — мониторинг изменений законодательства («регуляторная гильотина») и судебной практики (п. 10 паспорта — системы контроля и оценки качества проектирования).

3. Матрица прогнозной оценки рисков

Риск получения отрицательного заключения МГЭ является функцией двух ключевых переменных: качества проектной документации и сложности конструктивной системы. Даже при хорошем качестве ПД для уникальных систем с аутригерами вероятность положительного исхода снижается, что требует от управления проектом превентивных мер. На основе эмпирических данных построена двухфактор-

ная матрица, позволяющая на ранних стадиях проектирования количественно оценить вероятность получения отрицательного заключения МГЭ (см. табл. 2). Факторами выступают качество проектной документации от «отличного» до «неудовлетворительного» и сложность конструктивной системы — от рамной до ствольной с аутригерами.

Таблица 2

Матрица вероятности отрицательного заключения МГЭ для высотного объекта в составе ТПУ

№ п/п	Качество ПД / Сложность	Рамная	Связевая	Рамно-связевая	Ствольная	Ствольная с аутригерами
1	2	3	4	5	6	7
1	Отличное (ГОСТ, СП)	2%	5%	0%	15%	25%
2	Хорошее (незначительные недочеты)	0%	0%	30%	45%	0%
3	Удовлетворительное (требует доработок)	25%	40%	55%	70%	85%
4	Неудовлетворительное (критические ошибки)	0%	75%	85%	95%	99%

Источник: авторы исследования

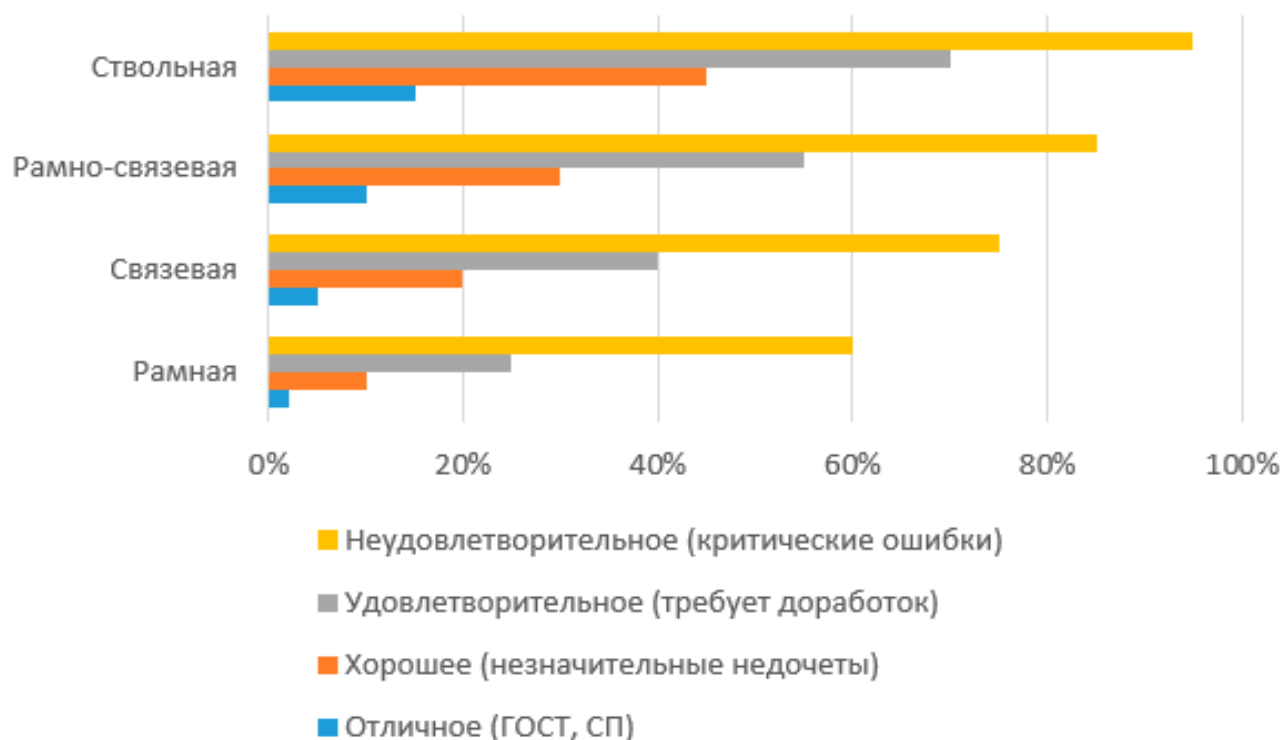


Рис. 2. График вероятности получения замечаний и отрицательного заключения государственной экспертизы в зависимости от конструктивного решения остова высотных зданий
 Источник: авторы исследования

Из матрицы следует, что даже при отличном качестве ПД для объекта с аутриггерной системой типичной для высотной гостиницы в ТПУ вероятность негативного исхода составляет 25%, что требует обязательного резервирования времени и бюджета на доработку документации либо на проведение предварительных нефор-

мальных консультаций с экспертами МГЭ, что повышает предсказуемость прохождения административных процедур. Полученный инструментарий соответствует п. 14 паспорта 2.1.8 — оценка технических и экологических рисков при строительстве транспортных сооружений.

Заклучение

1. Впервые для объектов транспортной инфраструктуры (высотных зданий в составе ТПУ) установлена количественная зависимость между сложностью конструктивной системы и интенсивностью правовых рисков на этапе государственной экспертизы. Переход к уникальным ствольным и аутриггерным системам увеличивает количество экспертных запросов в 10–15 раз, что требует адекватного ресурсного обеспечения юридического сопровождения.

2. Разработана структурно-функциональная модель управления правовыми рисками, интегрирующая проектную и юридическую деятельность. Модель позволяет формализовать процессы предварительной правовой экспертизы, взаимодей-

ствия с экспертной организацией и реагирования на замечания.

3. Предложена матрица прогнозной оценки вероятности отрицательного заключения МГЭ, которая может использоваться проектными и строительными организациями для планирования затрат и сроков на стадии концептуального проектирования высотных объектов транспортной инфраструктуры.

4. Результаты работы внедрены в практику деятельности ГБОУ АО ВО «Астраханский государственный архитектурно-строительный университет» при разработке проектной документации для объектов ТПУ г. Москвы, что подтверждено соответствующими актами [18–20].

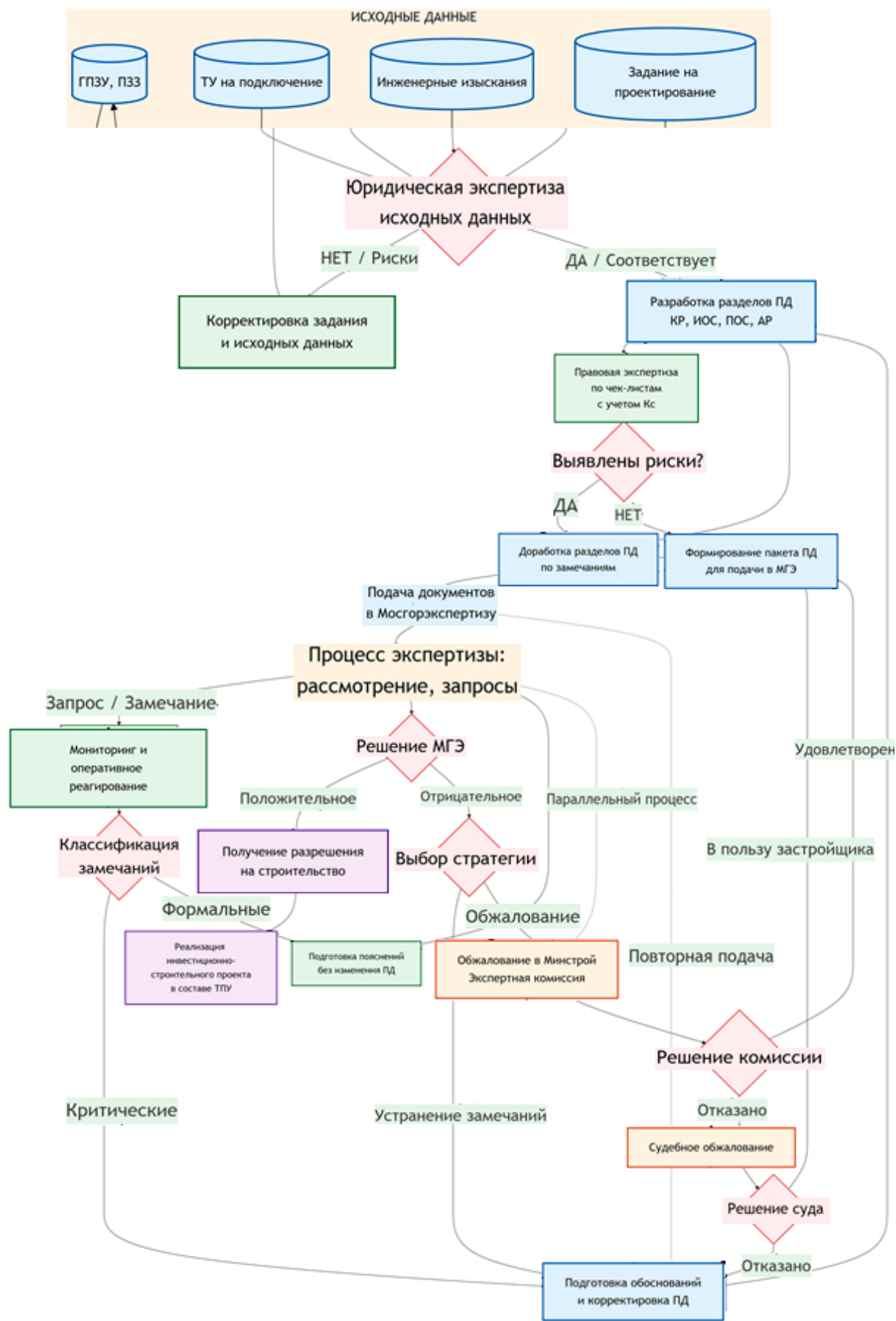


Рис. 3. Структурно-функциональная модель управления правовыми рисками на проектной стадии.
Источник: авторы исследования

Список литературы

1. Корнев А. В. Цифровые технологии, правовые риски и проблема их минимизации / А. В. Корнев // Актуальные проблемы российского права. — 2021. — Т. 16, № 9(130). — С. 11–20. — DOI: 10.17803/1994–1471.2021.130.9.011–020.
2. Тихомиров Ю. А. Право: прогнозы и риски / Ю. А. Тихомиров. — М.: Институт законодательства и сравнительного правоведения при Правительстве РФ, 2015. — 240 с.
3. Попондопуло В. Ф. Комплаенс как правовой инструмент минимизации рисков и профилактики правонарушений / В. Ф. Попондопуло, Д. А. Петров // Вестник Санкт-Петербургского университета. Право. — 2020. — Т. 11, № 1. — С. 102–114.
4. Паспорт научной специальности 2.1.8 «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей» (технические науки). — М.: ВАК, 2021.
5. Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 № 190-ФЗ (ред. от 08.08.2024).
6. Постановление Правительства Москвы от 17.04.2012 № 145-ПП «Об утверждении административных регламентов...».
7. МГСН 4.19–2005. Проектирование многофункциональных высотных зданий и зданий-комплексов в городе Москве.
8. Ali M. M. Structural developments in tall buildings: current trends and future prospects / M. M. Ali, K. S. Moon // Architectural Science Review. — 2018. — Vol. 61, No. 3. — P. 130–145. — DOI: 10.1080/00038628.2018.1468258.
9. Smith B. S. Tall building structures: analysis and design / B. S. Smith, A. Coull. — New York: Wiley-Interscience, 2019.
10. Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».
11. Постановление Правительства Российской Федерации от 05.03.2007 № 145 «О порядке организации и проведения государственной экспертизы проектной документации...».
12. Акимов П. А. Численное моделирование работы высотных зданий / П. А. Акимов, В. Н. Сидоров // Строительная механика и расчет сооружений. — 2022. — № 3. — С. 12–19.
13. Мамхегов М. А. Правовые риски в юридическом консультировании и механизмы их минимизации / М. А. Мамхегов // Государство, общество, личность: сборник статей VIII Международной научно-практической конференции. — Пенза: ПГУ, 2025. — С. 395–398.
14. Борисов Е. А. Регуляторная гильотина в сфере «Земля и недвижимость» / Е. А. Борисов, Е. И. Миронов // Евразийское научное объединение. — 2020. — № 11–5(69). — С. 381–384.
15. Наумова К. Д. Анализ проблем по оказанию муниципальной услуги «Выдача разрешения на строительство» / К. Д. Наумова, Е. Н. Босова // Аллея науки. — 2024. — Т. 1, № 5(92). — С. 653–666.
16. Купчикова Н. В. Экспертиза местоположения недвижимости и экспресс-оценка коммерческого потенциала территории на примере строительства современного жилого комплекса / Н. В. Купчикова, Ю. И. Убогович // Перспективы развития строительного комплекса. — 2013. — Т. 2. — С. 62–66.
17. Колчунов В. И. Сравнительный анализ уровня реализации функции города «жизнеобеспечение» в центральном и южном федеральных округах РФ / В. И. Колчунов, Е. А. Скобелева, Н. В. Купчикова // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. — 2014. — № 1(5). — С. 22–26.
18. Купчикова Н. В. Рейтинговая оценка устойчивости среды обитания жилого комплекса по системе «Зеленое строительство» / Н. В. Купчикова, А. В. Чумакова // Перспективы развития строительного комплекса. — 2014. — Т. 1. — С. 345–350.
19. Купчикова Н. В. Уровень развития градостроительной среды на урбанизированных территориях Астраханской области / Н. В. Купчикова, М. Н. Николаенко, Т. Ю. Овсянникова // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2018. — Т. 45, № 2. — С. 200–208. — DOI: 10.21822/2073–6185–2018–45–2–200–208.
20. Купчикова Н. В. Оптимизация в управлении инвестиционно-строительными проектами / Н. В. Купчикова, А. И. Кулакова // Перспективы развития строительного комплекса. — 2018. — № 12. — С. 192–195.

References

- 1 Kornev A. V. Tsifrovye tekhnologii, pravovye riski i problema ikh minimizatsii [Digital technologies, legal risks and the problem of their minimisation] // Aktualnye problemy rossijskogo prava [Current Issues of Russian Law].— 2021.— Vol. 16.— No. 9 (130).— P. 11–20.— DOI: 10.17803/1994–1471.2021.130.9.011–020. (In Russ.)
- 2 Tikhomirov Yu. A. Pravo: prognozy i riski [Law: forecasts and risks].— Moscow: Institute of Legislation and Comparative Law under the Government of the Russian Federation Publ., 2015.— 240 p. (In Russ.)
- 3 Popodopulo V. F., Petrov D. A. Komplaens kak pravovoj instrument minimizatsii riskov i profilaktiki pravonarushenij [Compliance as a legal instrument for risk minimisation and prevention of offences] // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Pravo [Bulletin of St. Petersburg University. Law].— 2020.— Vol. 11.— No. 1.— P. 102–114. (In Russ.)
- 4 Pasport nauchnoj spetsialnosti 2.1.8 «Proektirovanie i stroitelstvo dorog, metropolitenov, aerodromov, mostov i transportnykh tonnelej» (tekhnicheskie nauki) [Passport of scientific specialty 2.1.8 «Design and construction of roads, metro systems, aerodromes, bridges and transport tunnels» (technical sciences)].— Moscow: VAK Publ., 2021. (In Russ.)
- 5 Gradostroitelnyj kodeks Rossijskoj Federatsii ot 29.12.2004 No. 190-FZ (red. ot 08.08.2024) [Urban Planning Code of the Russian Federation dated 29.12.2004 No. 190-FZ (as amended on 08.08.2024)]. (In Russ.)
- 6 Postanovlenie Pravitelstva Moskvy ot 17.04.2012 No. 145-PP «Ob utverzhdenii administrativnykh reglamentov...» [Decree of the Moscow Government dated 17.04.2012 No. 145-PP «On Approval of Administrative Regulations...»]. (In Russ.)
- 7 MGSN4.19–2005. Proektirovanie mnogo-funktionalnykh vysotnykh zdaniy i zdaniy-kompleksov v gorode Moskve [Design of multifunctional high-rise buildings and building complexes in Moscow]. (In Russ.)
- 8 Ali M. M., Moon K. S. Structural developments in tall buildings: current trends and future prospects // Architectural Science Review.— 2018.— Vol. 61.— No. 3.— P. 130–145.— DOI: 10.1080/00038628.2018.1468258.
- 9 Smith B. S., Coull A. Tall building structures: analysis and design.— New York: Wiley-Interscience, 2019.
- 10 Federalnyj zakon ot 30.12.2009 No. 384-FZ «Tekhnicheskij reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzhenij» [Federal Law dated 30.12.2009 No. 384-FZ «Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures»]. (In Russ.)
- 11 Postanovlenie Pravitelstva Rossijskoj Federatsii ot 05.03.2007 No. 145 «O poryadke organizatsii i provedeniya gosudarstvennoj ekspertizy proektnoj dokumentatsii...» [Decree of the Government of the Russian Federation dated 05.03.2007 No. 145 «On the Procedure for Organising and Conducting State Expert Review of Project Documentation...»]. (In Russ.)
- 12 Akimov P. A., Sidorov V. N. Chislennoe modelirovanie raboty vysotnykh zdaniy [Numerical modelling of high-rise building performance] // Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij [Structural Mechanics and Analysis of Structures].— 2022.— No. 3.— P. 12–19. (In Russ.)
- 13 Mamkhegov M. A. Pravovye riski v yuridicheskom konsultirovanii i mekhanizmy ikh minimizatsii [Legal risks in legal consulting and mechanisms for their minimisation] // Gosudarstvo, obshchestvo, lichnost: sbornik statej VIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii.— Penza: PGU Publ., 2025.— P. 395–398. (In Russ.)
- 14 Borisov E. A., Mironov E. I. Regulyatornaya gilotina v sfere «Zemlya i nedvizhimost» [The regulatory guillotine in the field of «Land and Real Estate»] // Evrazijskoe nauchnoe obedinenie [Eurasian Scientific Association].— 2020.— No. 11–5 (69).— P. 381–384. (In Russ.)
- 15 Naumova K. D., Bosova E. N. Analiz problema po okazaniyu munitsipalnoj usluzhi «Vydacha razresheniya na stroitelstvo» [Analysis of issues in delivering the municipal service «Issuance of construction permits»] // Alleya nauki [Alley of Science].— 2024.— Vol. 1.— No. 5 (92).— P. 653–662. (In Russ.)
- 16 Kupchikova N. V., Ubogovich Yu. I. Ekspertiza mestopolozheniya nedvizhimosti i ekspress-otsenka kommercheskogo potentsiala territorii na primere stroitelstva sovremennogo zhilogo kompleksa [Expert assessment of real estate location and rapid evaluation of the commercial potential of a territory using the example of a modern residential complex] // Perspektivy razvitiya stroitel'nogo kompleksa [Prospects for the Development of the Construction Sector].— 2013.— Vol. 2.— P. 62–66. (In Russ.)
- 17 Kolchunov V. I., Skobeleva E. A., Kupchikova N. V. Sravnitelnyj analiz urovnya realizatsii funktsii goroda «zhizneobespechenie» v tsentralnom i yuzhnom federalnykh okrugakh RF [Comparative analysis of the implementation level of the urban life-support function in the Central and Southern

Federal Districts of the Russian Federation] // Biosferная sovместimost: chelovek, region, tekhnologii [Biospheric Compatibility: Man, Region, Technologies].— 2014.— No. 1 (5).— P. 22–26. (In Russ.)

18. Kupchikova N. V., Chumakova A. V. Rejtingovaya otsenka ustojchivosti sredy obitaniya zhilogo kompleksa po sisteme «Zelenoe stroitelstvo» [Rating assessment of the habitat sustainability of a residential complex under the Green Building system] // Perspektivy razvitiya stroitelnogo kompleksa [Prospects for the Development of the Construction Sector].— 2014.— Vol. 1.— P. 345–350. (In Russ.)

19. Kupchikova N. V., Nikolaenko M. N., Ovsyannikova T. Yu. Uroven razvitiya gradostroitelnoj sredy na urbanizirovannykh territoriyakh Astra-

khanskoj oblasti [Level of urban environment development in urbanised territories of the Astrakhan region] // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki [Bulletin of Dagestan State Technical University. Technical Sciences].— 2018.— Vol. 45.— No. 2.— P. 200–208.— DOI: 10.21822/2073–6185–2018–45–2–200–208. (In Russ.)

20. Kupchikova N. V., Kulakova A. I. Optimizatsiya v upravlenii investitsionno-stroitelnyimi proektami [Optimisation in the management of investment and construction projects] // Perspektivy razvitiya stroitelnogo kompleksa [Prospects for the Development of the Construction Sector].— 2018.— No. 12.— P. 192–195. (In Russ.)

Сведения об авторах	Information about the authors
Золина Татьяна Владимировна доктор технических наук, профессор кафедры «Промышленное и гражданское строительство» ГБОУ АО «Астраханский государственный архитектурно-строительный университет» Адрес: «Астраханский государственный архитектурно-строительный университет», 414056, Россия, г. Астрахань, ул. Татищева, д. 18 ORCID: 0000–0003–3701–8856 E-mail: zolinatv@yandex.ru	Zolina Tatiana Vladimirovna Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Industrial and Civil Engineering, Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering (ASUACE) Address: Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering, 18 Tatishcheva Street, Astrakhan, 414056, Russia ORCID: 0000–0003–3701–8856 E-mail: zolinatv@yandex.ru
Болдырева Юлия Анатольевна начальник управления по правовому, кадровому обеспечению и безопасности ГБОУ АО «Астраханский государственный архитектурно-строительный университет» Адрес: «Астраханский государственный архитектурно-строительный университет», 414056, Россия, г. Астрахань, ул. Татищева, д. 18 ORCID: 0009–0000–7849–0722 E-mail: boldyreva_ya@aucu.ru	Boldyreva Yulia Anatolyevna Head of the Department of Legal, Human Resources and Security Support, Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering (ASUACE) Address: Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering, 18 Tatishcheva Street, Astrakhan, 414056, Russia ORCID: 0009–0000–7849–0722 E-mail: boldyreva_ya@aucu.ru
Купчикова Наталья Викторовна доктор технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения» ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (ПУТ МИИТ)» Адрес: «Российский университет транспорта (ПУТ МИИТ)», 127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9 ORCID: 0000–0002–2986–4190 E-mail: kupchikova79@mail.ru	Kupchikova Natalia Viktorovna Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Structural Engineering, Buildings and Structures, Russian University of Transport (RUT MIIT) Address: Russian University of Transport (RUT MIIT), 9/9 Obraztsova Street, Moscow, 127994, Russia ORCID: 0000–0002–2986–4190 E-mail: kupchikova79@mail.ru

Статья получена 03.02.2026 | статья опубликована 25.03.2026

Article received 03.02.2026 | Article published 25.03.2026

УДК 624.075:625.1

ОЦЕНКА ЖИВУЧЕСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ РАМНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ ХРУПКОМ И ПЛАСТИЧЕСКОМ РАЗРУШЕНИИ

П. А. Кореньков

С. Е. Хохлунов

*ФГБОУ ВО Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет (НИУ МГСУ)*

Аннотация. Объектам транспортной инфраструктуры — вокзальным комплексам, пассажирским платформам, эстакадам и перекрытиям станций метрополитена — присущи риски аварийных воздействий, связанных с потерей несущей способности отдельных элементов, например, при наезде транспортного средства, взрыве или пожаре. В статье исследуется напряженно-деформированное состояние железобетонных рамных конструкций, моделирующих элементы транспортных сооружений, при гипотетическом отказе крайней колонны.

Цель исследования — установить влияние типа разрушения (пластического или хрупкого) на способность конструктивной системы к перераспределению усилий и предотвращению прогрессирующего обрушения. Метод исследования — прямой динамический расчет с интегрированием уравнений движения и учетом физической нелинейности материалов, а также демпфирования по модели Рэлея. Рассмотрены два варианта армирования: симметричное (пластическое разрушение, $\xi \leq \xi_R$) и переменное (хрупкое разрушение, $\xi > \xi_R$). Установлено, что при уровне нагружения 0,6–0,9 от предельной конструкции с пластическим характером разрушения демонстрируют затухающие колебания и стабилизацию напряженного состояния, тогда как в хрупких образцах наблюдается монотонный рост перемещений, свидетельствующий о развитии обрушения. Выявлено, что переармированные хрупкие сечения характеризуются более высокими пиковыми значениями скоростей и ускорений, что увеличивает динамическое догружение смежных элементов. Результаты могут быть использованы при проектировании и реконструкции железобетонных каркасов транспортных сооружений для повышения их живучести.

Ключевые слова: транспортные сооружения, железобетонные рамы, прогрессирующее обрушение, живучесть, динамическое догружение, хрупкое разрушение, пластическое разрушение, рамные каркасы, аварийные воздействия.

UDC 624.075:625.1

SURVIVABILITY ASSESSMENT OF REINFORCED CONCRETE FRAME STRUCTURES IN TRANSPORT FACILITIES UNDER BRITTLE AND DUCTILE DESTRUCTION

P.A. Korenkov

S.E. Khokhlunov

Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU)

Abstract. Transport infrastructure facilities, including station complexes, passenger platforms, overpasses, and metro station floor structures, are inherently exposed to emergency action risks arising from the loss of load-bearing capacity in individual elements due to causes such as vehicle impact, explosion, or fire. This article investigates the stress-strain state of reinforced concrete frame structures modelling elements of transport facilities under the hypothetical failure of an end column.

The objective of the study is to establish how the type of destruction, whether ductile or brittle, influences the ability of a structural system to redistribute forces and prevent progressive collapse. The research method is direct dynamic analysis with numerical integration of the equations of motion, accounting for physical material nonlinearity and Rayleigh damping. Two reinforcement configurations are considered: symmetric (ductile failure, $\xi \leq \xi^a$) and variable (brittle failure, $\xi > \xi^a$). It is established that at a load level of 0.6 to 0.9 of the ultimate capacity, structures with ductile failure exhibit damped oscillations and stabilisation of the stress state, while brittle specimens show a monotonic increase in displacements indicative of developing collapse. Over-reinforced brittle sections are found to produce higher peak velocities and accelerations, increasing the dynamic overloading of adjacent elements. The results may be applied in the design and reconstruction of reinforced concrete frames for transport facilities to enhance their survivability.

Keywords: transport facilities, reinforced concrete frames, progressive collapse, survivability, dynamic overloading, brittle destruction, ductile destruction, frame structures, emergency actions.

Введение

Обеспечение безопасности и живучести объектов транспортной инфраструктуры является одной из приоритетных задач при их проектировании и эксплуатации. Железобетонные рамные конструкции широко применяются в транспортном строительстве: они образуют несущий каркас пассажирских платформ, эстакад, перекрытий вестибюлей метрополитена, зданий вокзальных комплексов и других сооружений [1, 2]. Для таких объектов существует риск возникновения аварийных ситуаций, связанных с внезапным отказом или удалением одного из несущих элементов, например при наезде автотранспорта на опору путепровода, взрыве бытового газа в здании вокзала или террористическом акте [3, 4].

Внезапное выключение из работы колонны или другой вертикальной опоры приводит к динамическому догружению смежных конструкций, что может инициировать прогрессирующее обрушение — цепную реакцию разрушений, несоизмеримую исходному воздействию. Проблема

Цель настоящей работы

Исследовать влияние типа разрушения (пластического или хрупкого) на динамические характеристики и живучесть железобетонных рамных конструкций, моделирующих элементы транспортных сооружений, при гипотетическом отказе крайней колонны.

Для достижения цели решаются следующие задачи:

1. Разработка конечно-элементных моделей фрагментов рам с различными параметрами

защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения посвящено значительное количество исследований как в России, так и за рубежом [5–11]. Однако большинство работ ориентировано на жилые и общественные здания, тогда как специфика транспортных сооружений — повышенные динамические нагрузки, высокие требования к надежности и особенности конструктивных решений — учитывается недостаточно.

Особую роль в поведении конструкции при аварийном воздействии играет характер разрушения элементов: пластическое вязкое или хрупкое. Как показано в работах [12–15], тип разрушения определяется количеством продольной арматуры и классом бетона. В первом случае ($\xi \leq \xi_R$) разрушение начинается с текучести арматуры и сопровождается значительными деформациями, что позволяет конструкции перераспределять усилия и поглощать энергию. Во втором случае ($\xi > \xi_R$) разрушение происходит внезапно по сжатому бетону, что чревато лавинообразным обрушением.

армирования (симметричное и переменное).

2. Проведение модального анализа и определение параметров демпфирования по модели Рэлея.
3. Выполнение прямого динамического расчета при внезапном удалении колонны для различных уровней начальной эксплуатационной нагрузки ($0,3 M_{\text{эксп}}$, $0,6 M_{\text{эксп}}$, $0,9 M_{\text{эксп}}$).
4. Анализ кинематических параметров — перемещения, скорости, ускорения и внутренних усилий — изгибающие моменты, продольные и поперечные силы в элементах системы.

Научная новизна исследования

1. Впервые установлены количественные закономерности влияния типа разрушения хрупкое и пластическое на динамические параметры смежных элементов рамных конструкций при внезапном отказе колонны. Показано, что переармированные хрупкие сечения генерируют пиковые ускорения до 4500 м/с^2 , что в 1,8 раза выше, чем в пластических аналогах, что определяет степень динамического догружения системы.
2. Предложен критерий оценки живучести железобетонных рам транспортных соору-

жений, основанный не только на прочности, но и на характере затухания колебательного процесса. Доказано, что стабилизация перемещений в отличие от их монотонного роста является маркером способности системы сопротивляться прогрессирующему обрушению.

3. Выявлен эффект смены знака продольных сил в ригелях, то есть переход из сжатия в растяжение при хрупком разрушении колонны, что создает ранее не учитываемый риск разрушения узлов сопряжения.

Методы

В качестве объекта исследования принят фрагмент рамного железобетонного каркаса, состоящий из одного этажа и двух пролетов (рис. 1). Данная схема моделирует, например, участок перекрытия платформы или фрагмент каркаса вокзального павильона. Рассмотрены две модели (С1 и С2), отличающиеся параметрами армирования и классами бетона, что обеспечивает различные типы разрушения:

- модель С1: бетон класса В25, симметричное армирование ригелей ($2\varnothing 6 \text{ A400}$) и колонн ($2\varnothing 6 \text{ A400}$). Относительная высота сжатой зоны $\xi \leq \xi_R$ — ожидается пластическое разрушение;
- модель С2: бетон класса В40, переменное армирование ригелей ($2\varnothing 8 \text{ A500}$ в нижней зоне и $2\varnothing 4 \text{ Bp500}$ в верхней). $\xi > \xi_R$ — ожидается хрупкое разрушение.

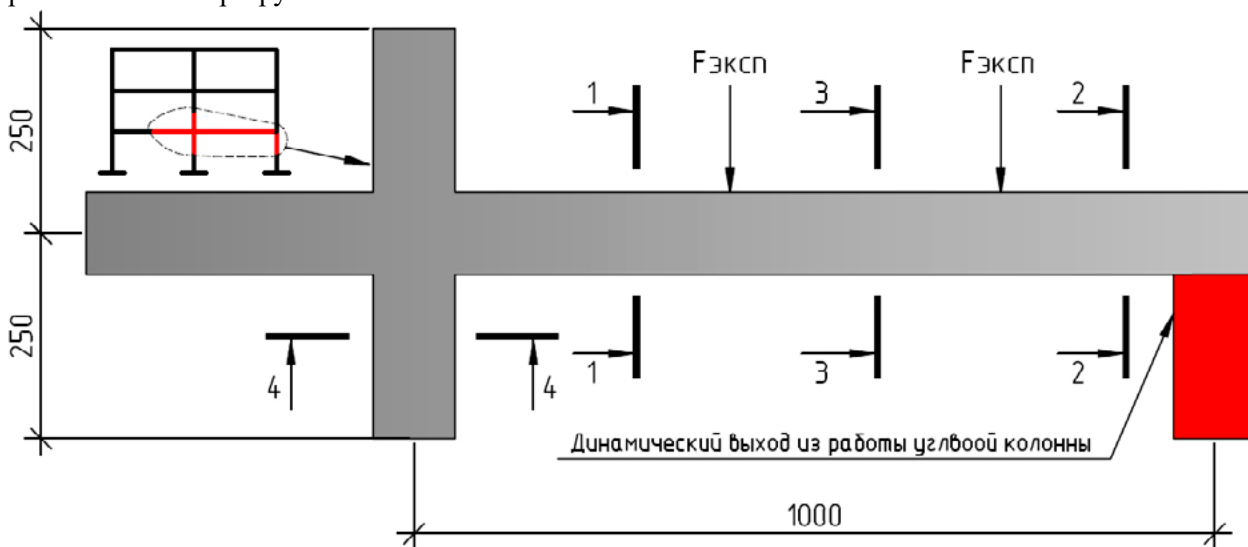


Рис. 1. Фрагмент рамного каркаса, моделирующий элемент перекрытия пассажирской платформы.

Источник: авторы исследования

Геометрические размеры поперечных сечений: колонны и ригели $50 \times 100 \text{ мм}$, это масштабная модель, позволяющая на качественном уровне оценить эффекты. Прочностные и деформационные характеристики бетона и арматуры задавались с учетом нелинейной диаграммы деформирования. Величины сосредоточенных нагрузок определялись итеративно, исходя из несущей способности сечений с учетом коэффициентов надежности по СП 20.13330.2018.

Методика динамического расчета. Расчет выполнен методом прямого динамического

интегрирования уравнений движения с использованием программного комплекса. Мгновенное удаление крайней правой колонны моделировалось путем снятия соответствующих связей за время, равное 0,1, от основного периода собственных колебаний конструкции Т. Демпфирование учитывалось по модели Рэлея, коэффициенты α и β определялись из условий равенства заданных коэффициентов демпфирования, принято $\zeta_1 = \zeta_2 = 0,1$ для первых двух форм колебаний. Круговые частоты ω_1 и ω_2 получены из модального анализа.

Результаты и обсуждение

Анализ динамических параметров

На рисунках 2–5 представлены графики изменения во времени перемещений узла над удаленной колонной, а также скоростей и ускорений для трех уровней начальной нагрузки: 0,3 Мэкс; 0,6 Мэкс; 0,9 Мэкс. Дополнительно показаны эпюры внутренних усилий в наиболее нагруженном элементе — ригеле у неразрушенной колонны.

Уровень нагрузки 0,3 Мэкс. При относительно низком уровне загрузки (рис. 2, 3) обе

конструкции ведут себя упруго с затухающими колебаниями. Однако для хрупкого образца С2 перемещения узла над удаленной колонной нарастают монотонно, не стабилизируясь полностью, что свидетельствует о начале развития неупругих деформаций. Максимальная скорость в образце С2 (140 мм/с) почти вдвое превышает скорость в С1 (80 мм/с), а ускорения достигают 4500 м/с^2 против 2500 м/с^2 , что указывает на более интенсивный динамический отклик хрупкой системы.

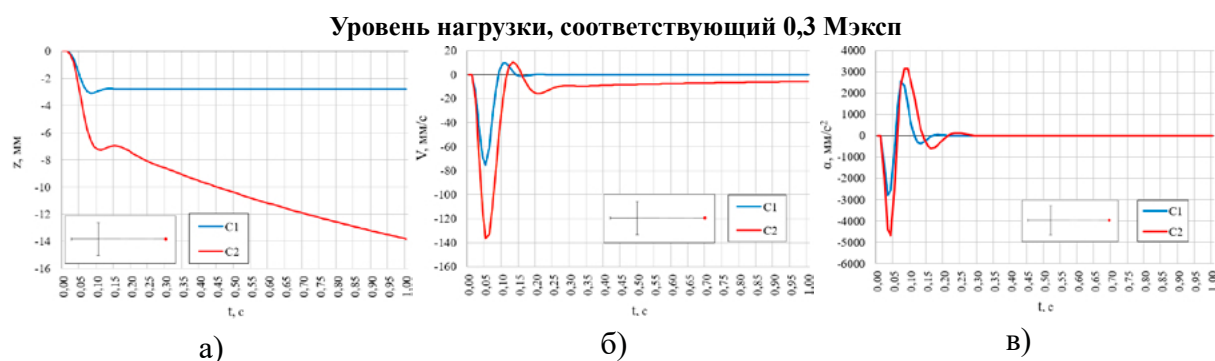


Рис. 2. Изменение во времени перемещения (а), скорости (б), ускорения (в) при уровне нагрузки 0,3 Мэкс.

Источник: авторы исследования

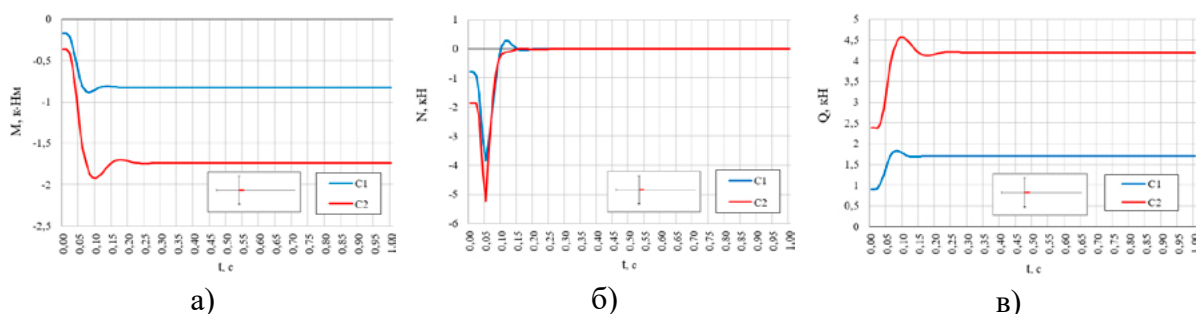


Рис. 3. Изменение во времени изгибающего момента (а), продольной силы (б), поперечной силы (в) при уровне нагрузки 0,3 Мэкс в элементе ригеля у неразрушенной колонны.

Источник: авторы исследования

Уровень нагрузки 0,6 Мэкс. При среднем уровне нагрузки различия становятся более выраженными. В пластическом образце С1 колебания затухают к 0,4 с, перемещение стабилизируется на уровне 10 мм. В хрупком образце С2 перемещение продолжает линейно расти, достигая к 0,5 с значения 16 мм, что в 8 раз больше, чем при 0,3 Мэкс. Изгибающий момент в ригеле у колонны в образце С2 возрастает до $3,2 \text{ кН} \cdot \text{м}$ против $1,65 \text{ кН} \cdot \text{м}$ в С1, а продольная сила меняет знак, переходя из сжатия в растяжение, что создает дополнительные риски для узловых соединений.

Уровень нагрузки 0,9 Мэкс. При приближении к предельному состоянию (рис. 4, 5) пла-

стическая конструкция С1 демонстрирует затухающие колебания и стабилизацию перемещений на уровне 14 мм. В хрупкой конструкции С2 колебательный процесс отсутствует, перемещения нарастают практически линейно, достигая к концу интервала 18 мм — это классический признак начала прогрессирующего обрушения. Скорости перемещений достигают 280 мм/с , что в 3,5 раза выше, чем в пластическом варианте. Продольная сила в ригеле С2 резко переходит из сжатия в растяжение, а изгибающий момент стабилизируется на уровне $5,2 \text{ кН} \cdot \text{м}$, что в 2,3 раза выше начального.

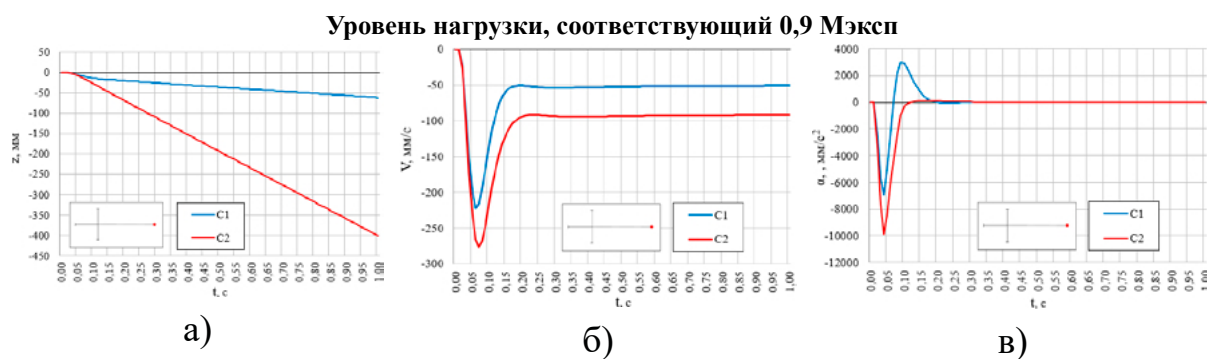


Рис. 4. Изменение во времени перемещения (а), скорости (б), ускорения (в) при уровне нагрузки 0,9 Мэксп.

Источник: авторы исследования

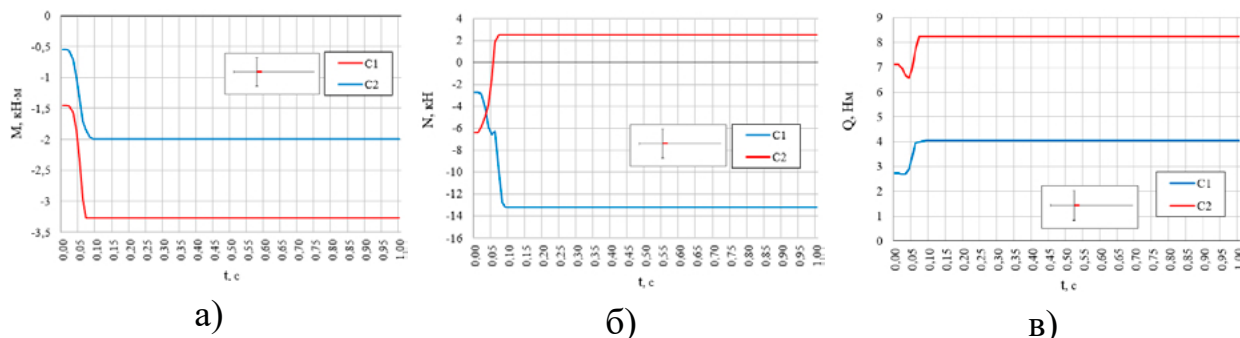


Рис. 5. Изменение во времени изгибающего момента (а), продольной силы (б), поперечной силы (в) при уровне нагрузки 0,9 Мэксп в элементе ригеля у неразрушенной колонны.

Источник: авторы исследования

Полученные результаты имеют прямое отношение к проектированию транспортных объектов, например, для железобетонных рамных конструкций вокзалов, станций метро и эстакад критически важно обеспечить пластический механизм разрушения при аварийных воздействиях, что достигается ограничением процента армирования ($\xi \leq \xi_R$) и применением бетонов умеренных классов не выше В30–В35. Переармированные хрупкие сечения, обладающие повышенной жесткостью, создают иллюзию запаса прочности, но в аварийной ситуации провоцируют дина-

мический удар по смежным элементам и могут инициировать обрушение.

Кроме того, для транспортных сооружений характерны повышенные требования к сохранению функциональности после локальных разрушений. Например, при повреждении колонны эстакады необходимо обеспечить возможность проезда спецтехники и эвакуации. Пластические конструкции, благодаря способности к перераспределению усилий и затуханию колебаний, в большей степени удовлетворяют этим требованиям.

Заключение

1. Проведено численное исследование напряженно-деформированного состояния железобетонных рамных конструкций, моделирующих элементы транспортных сооружений (пассажирские платформы, перекрытия вокзалов, эстакады), при внезапном отказе крайней колонны. Учтены физическая нелинейность материалов и демпфирование по модели Рэлея.
2. Установлено, что тип разрушения (пластическое или хрупкое) определяет способность системы сопротивляться прогрессирующему обрушению. Конструкции с пластическим характером разрушения ($\xi \leq \xi_R$) демонстрируют затухающие колебания и стабилизацию внутренних усилий даже при уровне нагрузки 0,9 от предельного, что свидетельствует о высокой живучести.
3. Конструкции с хрупким разрушением ($\xi > \xi_R$, переармированные) при уровне нагрузки 0,6–0,9 Мэксп характеризуются отсутствием колебательного процесса, монотонным ростом перемещений и резким изменением знака продольных сил в ригелях, что создает предпосылки для лавинообразного обрушения.
4. Для транспортных сооружений, требующих повышенной надежности и сохранения функциональности после аварийных воздействий, рекомендуется проектировать железобетонные каркасы с обеспечением пластического механизма разрушения: ограничение про-

цента армирования, применение бетонов умеренных классов. Полученные результаты могут быть использованы при актуализации

нормативных документов по проектированию транспортных сооружений (п. 8 паспорта специальности 2.1.8).

Список литературы

1. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03–84*.— М.: Минрегион России, 2011.— 347 с.
2. СНиП 32–04–97. Тоннели железнодорожные и автодорожные.— М.: Госстрой России, 1997.— 95 с.
3. Бондаренко В. М., Колчунов В. И. Экспозиция живучести железобетона // Известия вузов. Строительство.— 2007.— № 5.— С. 4–8.
4. Travush V. I., Fedorova N. V. Survivability of structural systems of buildings with special effects // Civil Engineering.— 2018.— Vol. 81, No. 5.— P. 73–80.
5. Elsanadedy H. M., Almusallam T. H., Al-Salloum Y. A., Abbas H. Investigation of precast RC beam-column assemblies under column loss scenario // Construction and Building Materials.— 2017.— No. 142.— P. 552–571.— DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.110.
6. Saffari H., Javad Mashhadi J. Assessment of dynamic increase factor for progressive collapse analysis of RC structures // Engineering Failure Analysis.— 2018.— No. 84.— P. 300–310.— DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.11.011.
7. Федоров В. С., Меднов Е. А. Влияние исходного напряженно-деформированного состояния и уровня нагруженности на возможный динамический эффект при аварийном разрушении опоры в неразрезных стальных балках // Строительство и реконструкция.— 2010.— № 6.— С. 48–52.
8. Кабанцев О. В., Тамразян А. Г. Учет изменений расчетной схемы при анализе работы конструкции // Инженерно-строительный журнал.— 2014.— № 5(49).— С. 15–26.— DOI: 10.5862/MCE.49.2.
9. Колчунов В. И., Колчунов Вл. И., Федорова Н. В. Деформационные модели железобетона при особых воздействиях и отказе конструктивных элементов // Промышленное и гражданское строительство.— 2018.— № 8.— С. 54–60.
10. Кодыш Э. Н. Проектирование защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения с учетом возникновения особого предельного состояния // Промышленное и гражданское строительство.— 2018.— № 10.— С. 95–101.
11. Fialko S., Kabantsev O., Perelmuter A. Elasto-plastic progressive collapse analysis based on the integration of the equations of motion // Magazine of Civil Engineering.— 2021.— Vol. 102, No. 2.— P. 10214.— DOI: 10.34910/MCE.102.14.
12. Колчунов В. И., Бушова О. Б., Кореньков П. А. Деформирование и разрушение железобетонных рам с ригелями, армированными наклонными стержнями, при особых воздействиях // Строительство и реконструкция.— 2022.— № 1(99).— С. 18–28.
13. Колчунов В. И., Кореньков П. А., Фан Д. Г. Особое предельное состояние в железобетонных каркасах с узлами, усиленными косвенным армированием при аварийных воздействиях // Вестник МГСУ.— 2021.— Т. 16, № 11.— С. 1462–1472.
14. Федорова Н. В., Ву Н. Т., Медянкин М. Д. Анализ нелинейного статико-динамического деформирования железобетонных рам в запредельных состояниях // Научный журнал строительства и архитектуры.— 2021.— № 4(64).— С. 11–24.
15. Федорова Н. В., Московцева В. С., Амелина М. А., Демьянов А. И. Определение динамических усилий в сложнапряженных элементах железобетонных рам при особом воздействии // Известия высших учебных заведений. Строительство.— 2023.— № 2(770).— С. 5–15.— DOI: 10.32683/0536–1052–2023–770–2–5–15.
16. Nguyen V. H., Tan K. H. Progressive Collapse Behaviour of Earthquake-Damaged Interior Precast Concrete Joints with Headed Bars and Plastic Hinge Relocation // Engineering Structures.— 2024.— Vol. 306.— URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029624003791> (дата обращения: 14.05.2025).
17. Mirzahosseini H., Mirhosseini S. M., Zeighami E. Progressive Collapse Assessment of Reinforced Concrete (RC) Buildings with High-Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composites (HPFRCC) // Structures.— 2023.— Vol. 49.— P. 139–151.— URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352012423001157> (дата обращения: 14.05.2025).
18. Wang H., Li S., Zhai C., Shan S. Progressive Collapse Resistance of Self-Centering Infilled Precast Concrete Frame under Side Column Removal Scenario // Engineering Structures.— 2024.— Vol. 301.— URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029623016668> (дата обращения: 14.05.2025).
19. Tamrazyan A. Reduce the impact of dynamic strength of concrete under fire conditions on bearing capacity of reinforced concrete columns //

Applied Mechanics and Materials.— 2014.— Vol. 475–476.— P. 1563–1566.— DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.475–476.1563.

20. Alekseytsev A., Sazonova S. Numerical Analysis of the Buried Fiber Concrete Slabs Dynamics under Blast Loads // Magazine of Civil Engineering.— 2023.— No. 1(117).— P. 11703.— DOI: 10.34910/MCE.117.3.

21. Кайдас П. А., Меликсетян С. Р., Коренькова О. О. Оценка прочности монолитных и сборно-монолитных железобетонных балок

с использованием диаграммных методов расчета // Инженерно-строительный вестник Прикаспия.— 2025.— № 1(51).— С. 36–40.— DOI: 10.52684/2312–3702–2025–51–1–36–40.

22. Меликсетян С. Р., Кайдас П. А., Коренькова О. О. Прочность и деформативность изгибаемых монолитных железобетонных элементов при динамических аварийных воздействиях // Инженерно-строительный вестник Прикаспия.— 2025.— № 2(52).— С. 11–16.— DOI: 10.52684/2312–3702–2025–52–2–11–16.

References

1. SP 35.13330.2011. Mosty i truby. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.05.03–84 [SP 35.13330.2011. Bridges and culverts. Updated edition of SNiP 2.05.03–84*].— Moscow: Ministry of Regional Development of Russia Publ., 2011.— 347 p. (In Russ.)

2. SNiP 32–04–97. Tonneli zheleznodorozhnye i avtodorozhnye [Railway and road tunnels].— Moscow: Gosstroy Rossii Publ., 1997.— 95 p. (In Russ.)

3. Bondarenko V. M., Kolchunov V. I. Ekspozitsiya zhivuchesti zhelezobetona [The survivability exposure of reinforced concrete] // Izvestiya vuzov. Stroitelstvo [News of Higher Educational Institutions. Construction].— 2007.— No. 5.— P. 4–8. (In Russ.)

4. Travush V. I., Fedorova N. V. Survivability of structural systems of buildings with special effects // Civil Engineering.— 2018.— Vol. 81.— No. 5.— P. 73–80.

5. Elsanadedy H. M., Almusallam T. H., Al-Salloum Y. A., Abbas H. Investigation of precast RC beam-column assemblies under column loss scenario // Construction and Building Materials.— 2017.— No. 142.— P. 552–571.— DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.110.

6. Saffari H., Javad Mashhadi J. Assessment of dynamic increase factor for progressive collapse analysis of RC structures // Engineering Failure Analysis.— 2018.— No. 84.— P. 300–310.— DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.11.011.

7. Fedorov V. S., Mednov E. A. Vliyanie iskhodnogo napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i urovnya nagruzhennosti na vozmozhnyj dinamicheskij effekt pri avarijnom razrushenii opory v nerazreznykh stalnykh balkakh [Influence of the initial stress-strain state and load level on the possible dynamic effect under emergency failure of a support in continuous steel beams] // Stroitelstvo i rekonstruktsiya [Construction and Reconstruction].— 2010.— No. 6.— P. 48–52. (In Russ.)

8. Kabantsev O. V., Tamrazyan A. G. Uchet

izmenenij raschetnoj skhemy pri analize raboty konstruksii [Accounting for changes in the design scheme in structural analysis] // Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal [Magazine of Civil Engineering].— 2014.— No. 5 (49).— P. 15–26.— DOI: 10.5862/MCE.49.2. (In Russ.)

9. Kolchunov V. I., Kolchunov V. I., Fedorova N. V. Deformatsionnye modeli zhelezobetona pri osobykh vozdeystviyakh i otkaze konstruktivnykh elementov [Deformation models of reinforced concrete under special actions and failure of structural elements] // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo [Industrial and Civil Engineering].— 2018.— No. 8.— P. 54–60. (In Russ.)

10. Kodysh E. N. Proektirovanie zashchity zdaniy i sooruzheniy ot progressiruyushchego obrusheniya s uchetom vozniknoveniya osobogo predelnogo sostoyaniya [Design of protection of buildings and structures against progressive collapse considering a special limit state] // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo [Industrial and Civil Engineering].— 2018.— No. 10.— P. 95–101. (In Russ.)

11. Fialko S., Kabantsev O., Perelmutter A. Elastoplastic progressive collapse analysis based on the integration of the equations of motion // Magazine of Civil Engineering.— 2021.— Vol. 102.— No. 2.— Art. 10214.— DOI: 10.34910/MCE.102.14.

12. Kolchunov V. I., Bushova O. B., Korenkov P. A. Deformirovanie i razrushenie zhelezobetonnykh ram s rigelyami, armirovannyimi naklonnyimi sterzhnyami, pri osobykh vozdeystviyakh [Deformation and failure of reinforced concrete frames with beams reinforced with inclined bars under special actions] // Stroitelstvo i rekonstruktsiya [Construction and Reconstruction].— 2022.— No. 1 (99).— P. 18–28. (In Russ.)

13. Kolchunov V. I., Korenkov P. A., Fan D. G. Osoboe predelnoe sostoyanie v zhelezobetonnykh karkasakh s uzlamy, usilennymi kosvennym armirovaniem pri avarijnykh vozdeyst-

viyakh [Special limit state in reinforced concrete frames with joints reinforced by indirect reinforcement under emergency actions] // Vestnik MGSU [Proceedings of MGSU].— 2021.— Vol. 16.— No. 11.— P. 1462–1472. (In Russ.)

14. Fedorova N. V., Vu N. T., Medyanin M. D. Analiz nelinejnogo statiko-dinamicheskogo deformirovaniya zhelezobetonnykh ram v zapredelnykh sostoyaniyakh [Analysis of nonlinear static-dynamic deformation of reinforced concrete frames in post-limit states] // Nauchnyj zhurnal stroitelstva i arkhitektury [Scientific Journal of Civil Engineering and Architecture].— 2021.— No. 4 (64).— P. 11–24. (In Russ.)

15. Fedorova N. V., Moskovtseva V. S., Amelina M. A., Demyanov A. I. Opredelenie dinamicheskikh usilij v slozhno napryazhyonnykh elementakh zhelezobetonnykh ram pri osobom vozdeystvii [Determination of dynamic forces in complex-stressed elements of reinforced concrete frames under special action] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Stroitelstvo.— 2023.— No. 2 (770).— P. 5–15.— DOI: 10.32683/0536–1052–2023–770–2–5–15. (In Russ.)

16. Nguyen V. H., Tan K. H. Progressive collapse behaviour of earthquake-damaged interior precast concrete joints with headed bars and plastic hinge relocation // Engineering Structures.— 2024.— Vol. 306.— Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029624003791> (accessed: 14.05.2025).

17. Mirzahosseini H., Mirhosseini S. M., Zeighami E. Progressive collapse assessment of reinforced concrete (RC) buildings with HPFRCC // Structures.— 2023.— Vol. 49.— P. 139–151.— Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352012423001157> (accessed: 14.05.2025).

18. Wang H., Li S., Zhai C., Shan S. Progressive collapse resistance of self-centering infilled precast concrete frame under side column removal scenario // Engineering Structures.— 2024.— Vol. 301.— Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029623016668> (accessed: 14.05.2025).

19. Tamrazyan A. Reduce the impact of dynamic strength of concrete under fire conditions on bearing capacity of reinforced concrete columns // Applied Mechanics and Materials.— 2014.— Vol. 475–476.— P. 1563–1566.— DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.475–476.1563.

20. Alekseytsev A., Sazonova S. Numerical analysis of the buried fiber concrete slabs dynamics under blast loads // Magazine of Civil Engineering.— 2023.— No. 1 (117).— Art. 11703.— DOI: 10.34910/MCE.117.3.

21. Kajdas P. A., Meliksetsyan S. R., Korenkova O. O. Otsenka prochnosti monolitnykh i sborno-monolitnykh zhelezobetonnykh balok s ispolzovaniem diagrammnykh metodov rascheta [Strength assessment of monolithic and composite reinforced concrete beams using diagram-based methods] // Inzhenerno-stroitelnyj vestnik Prikaspiya.— 2025.— No. 1 (51).— P. 36–40.— DOI: 10.52684/2312–3702–2025–51–1–36–40. (In Russ.)

22. Meliksetsyan S. R., Kajdas P. A., Korenkova O. O. Prochnost i deformativnost izgibayemykh monolitnykh zhelezobetonnykh elementov pri dinamicheskikh avariynnykh vozdeystviyakh [Strength and deformability of flexural monolithic reinforced concrete elements under dynamic emergency actions] // Inzhenerno-stroitelnyj vestnik Prikaspiya.— 2025.— No. 2 (52).— P. 11–16.— DOI: 10.52684/2312–3702–2025–52–2–11–16. (In Russ.)

Сведения об авторах	Information about the authors
Кореньков Павел Анатольевич кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленное и гражданское строительство» ФГБОУ ВО Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ) Адрес: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26 ORCID: 0000–0003–1847–4303 E-mail: kpa_gbk@mail.ru	Korenkov Pavel Anatolyevich Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Industrial and Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU) Address: NRU MGSU, 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russia ORCID: 0000–0003–1847–4303 E-mail: kpa_gbk@mail.ru
Хохлунов Сергей Евгеньевич студент ФГБОУ ВО Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ) Адрес: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26 ORCID: 0009–0005–7641–7341 E-mail: khokhlunov02mf@mail.ru	Khokhlunov Sergei Evgenyevich Student, Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU) Address: NRU MGSU, 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russia ORCID: 0009–0005–7641–7341 E-mail: khokhlunov02mf@mail.ru

Статья получена 04.02.2026 | статья опубликована 25.03.2026

Article received 04.02.2026 | Article published 25.03.2026

ФОСФОГИПСОВОЕ ВЯЖУЩЕЕ ДЛЯ ТРАНСПОРТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Е. В. Тарарушкин

А. А. Провоторов

ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (РУТ МИИТ)»

Аннотация. Фосфогипс (ФГ) — крупнотоннажный отход переработки фосфатного сырья в минеральные удобрения. В статье рассматриваются две модификации очищенного фосфогипсового вяжущего с преимущественным содержанием α - и β -полугидрата сульфата кальция.

Накопление фосфогипса в отвалах создает серьезную экологическую угрозу. В то же время транспортное строительство (возведение дорог, мостов, тоннелей) нуждается в доступных и эффективных материалах. Цель работы — оценить потенциал применения фосфогипса в качестве вяжущего для конструктивных слоев дорожных одежд, оснований и малоответственных элементов транспортных сооружений путем исследования долгосрочной кинетики набора его прочности.

Проведены экспериментальные исследования образцов-балочек размером $40 \times 40 \times 160$ мм из β -ФГ, α -ФГ, α -ФГ с полипропиленовой фиброй, а также коммерческого гипса (КГ) для сравнения. Образцы твердели в нормальных условиях. В возрасте от 2 часов до 90 суток определяли изменение средней плотности, прочности при сжатии и изгибе.

Установлено, что наиболее интенсивное испарение свободной воды происходит в первые 7 суток. Для β -ФГ (низкомарочное вяжущее, Г-2) характерен двухэтапный набор прочности до 60 суток с итоговым приростом прочности на сжатие 384% от марочной. Для α -ФГ (вяжущее Г-10) также выявлен двухэтапный набор прочности, но до 90 суток, с приростом прочности на сжатие 99%. Введение фибры не повышает марочную прочность, но влияет на кинетику испарения воды. В процессе наблюдения снижение прочности не установлено.

Ключевые слова: фосфогипс, транспортное строительство, вторичные ресурсы, кинетика твердения, прочность при сжатии, сульфат кальция, дисперсное армирование, дорожно-строительные материалы.

PHOSPHOGYPSUM BINDER FOR TRANSPORT CONSTRUCTION

E. V. Tararushkin

A. A. Provotorov

Russian University of Transport (RUT MIIT)

Abstract. Phosphogypsum (PG) is a large-tonnage by-product of phosphate raw material processing in the manufacture of mineral fertilisers. This article examines two modifications of purified phosphogypsum binder with a predominant content of the α - and β -hemihydrate forms of calcium sulphate.

The accumulation of phosphogypsum in stockpiles poses a serious environmental threat. At the same time, transport construction, encompassing the building of roads, bridges, and tunnels, requires readily available and effective materials.

The objective of the work is to assess the potential of phosphogypsum as a binder for structural layers of road pavements, subbase courses, and low-criticality elements of transport structures by investigating the long-term kinetics of strength gain.

Experimental tests were conducted on $40 \times 40 \times 160$ mm beam specimens made from β -PG, α -PG, α -PG with polypropylene fibres, and commercial gypsum (CG) as a reference material. Specimens were cured under

standard conditions. Changes in average density, compressive strength, and flexural strength were measured at ages ranging from 2 hours to 90 days.

It was established that the most intensive evaporation of free water occurs within the first 7 days. The β -PG (a low-grade binder, G-2) exhibits a two-stage strength gain over 60 days, with a total compressive strength increase of 384% relative to the grade strength. The α -PG (binder G-10) also demonstrates a two-stage strength gain, but over 90 days, with a compressive strength increase of 99%. The addition of fibres does not increase grade strength but affects the kinetics of water evaporation. No strength reduction was observed during the monitoring period.

Keywords: phosphogypsum, transport construction, secondary resources, hardening kinetics, compressive strength, calcium sulphate, fibre reinforcement, road construction materials.

Введение

Современное транспортное строительство, включающее возведение и реконструкцию автомобильных и железных дорог, мостов, тоннелей, метрополитенов и аэродромов, предъявляет высокие требования к объемам и качеству применяемых материалов [1]. Одновременно с этим острой экологической проблемой является накопление промышленных отходов, в частности фосфогипса — побочного продукта переработки фосфатного сырья в удобрения. Ежегодный мировой объем образования ФГ достигает 300 млн тонн, а к 2050 году общий объем накопленного материала может составить 11 млрд тонн [2, 3]. В Российской Федерации эта проблема также стоит крайне остро [4–6].

Использование вторичных ресурсов, таких как фосфогипс, в производстве строительных материалов является одним из наиболее перспективных путей решения экологических задач и создания импортозамещающей сырьевой базы [5, 6]. Современные технологии очистки позволяют получать фосфогипс с минимальным содержанием примесей, пригодный для практического использования [7, 8]. Однако для широкого внедрения ФГ в транспортное строительство необходимо детальное изучение его свойств во времени.

Ключевым параметром, определяющим возможность применения материала в несущих конструкциях и слоях дорожных одежд, является стабильность его физико-механических характеристик и кинетика набора прочности [9–11]. Для

традиционных цементных бетонов эти процессы хорошо изучены [12–14], однако для фосфогипсовых вяжущих, особенно очищенных, данные о долгосрочной кинетике твердения в литературе представлены недостаточно. Настоящая работа направлена на восполнение этого пробела.

Целью исследования является оценка потенциала применения фосфогипса в транспортном строительстве путем экспериментального изучения кинетики набора прочности его α - и β -модификаций [15–17].

Научная новизна исследования:

- впервые для очищенного фосфогипса, в отличие от коммерческого гипса, установлена полная кинетика твердения на период до 90 суток, включая двухэтапный характер набора прочности для α - и β -модификаций;
- доказано отсутствие спадов прочности во времени деградации структуры у затвердевшего фосфогипса, что подтверждает стабильность его кристаллизационной структуры и принципиальную возможность применения в несущих слоях транспортной инфраструктуры;
- выявлен ингибирующий эффект остаточных фосфорных примесей, замедляющий, но не прекращающий процесс твердения, что приводит к более длительному (до 90 суток) и значительному приросту прочности α -ФГ до 35 МПа, что отличает его от традиционных гипсовых вяжущих и открывает перспективы для создания материалов с заданными сроками набора прочности.

Методы

В качестве объектов исследования использовали очищенный фосфогипс производства АО «ВМУ», в котором методами термообработки было получено преимущественное содержание β - и α -модификаций полугидрата сульфата кальция, образцы β -ФГ и α -ФГ соответственно. Для оценки влияния дисперсного армирования были изготовлены образцы α -ФГ с добавлением 0,47% полипропиленовой

фибры длиной 6 мм (α -ФГф). В качестве эталона сравнения использовали коммерческое гипсовое вяжущее (КГ).

Удельную поверхность вяжущих определяли на приборе ПСХ-10. Водогипсовое отношение (В/Г) для каждого состава подбирали по ГОСТ 23789–2018, обеспечивая расплыв теста 180 ± 5 мм. Сроки схватывания определяли на приборе Вика.

Из каждого состава были изготовлены образцы-балочки размером $40 \times 40 \times 160$ мм. Образцы твердели в нормальных условиях, температура 20 ± 2 °С, влажность 60–70%. Испытания на изгиб

и сжатие, а также определение средней плотности проводили в регламентированные сроки: 2 часа, 1, 3, 7, 14, 28, 45, 60 и 90 суток по методикам ГОСТ 23789–2018 [18–20].

Результаты и обсуждение

Исследование кинетики изменения плотности (рис. 1, 2) показало, что наиболее интенсивное испарение избыточной воды затворения происходит в первые 7 суток для всех типов вяжущего. Для β -ФГ снижение плотности за этот период составило 76% от общего изменения, а процесс продолжался вплоть до 60 суток. Для α -ФГ и α -ФГф основное испарение также завершается

к 7 суткам (79% и 99% снижения соответственно), что коррелирует с формированием макропористой структуры материала. Введение фибры в состав α -ФГф приводит к большей неравномерности плотности на этапе 7–45 суток, что, вероятно, связано с особенностями транспорта влаги в зонах контакта фибры с матрицей.

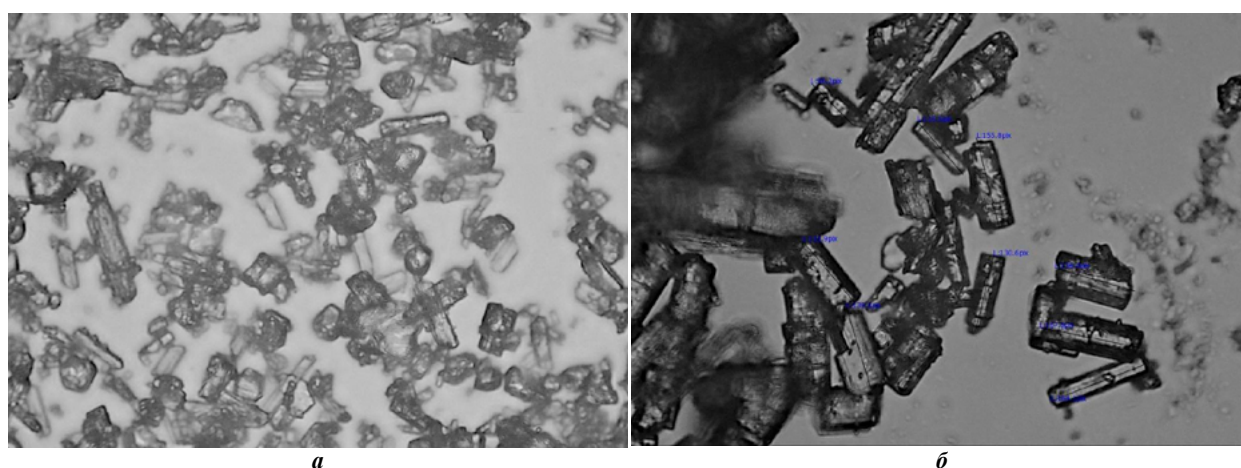


Рис. 1. Фотографии кристаллитов образцов ФГ: а— β -ФГ; б— α -ФГ.
Источник: авторы исследования

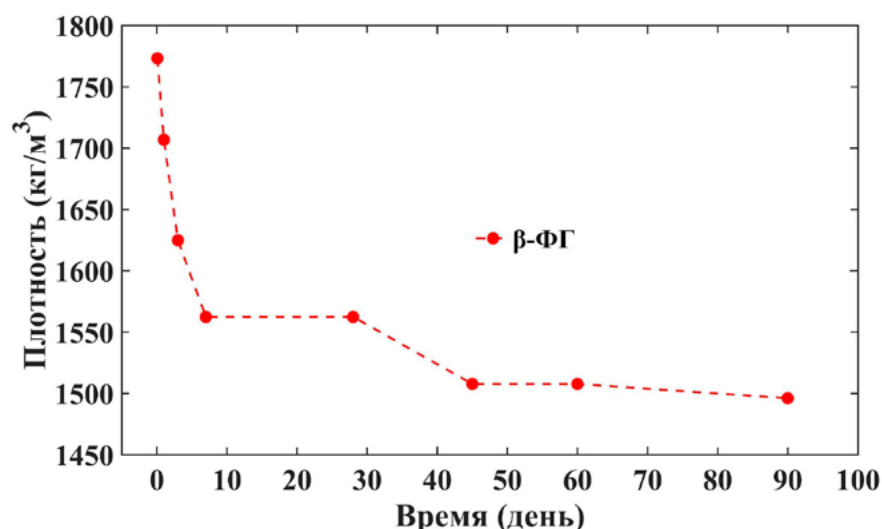


Рис. 2. Изменение во времени средней плотности затвердевших образцов из β -модификации вяжущего.
Источник: авторы исследования

Таблица 1

Прочностные характеристики вяжущих в возрасте 2 часа

№ п/п	Состав	Прочность на сжатие, МПа	Прочность на изгиб, МПа	Марка по ГОСТ 125
1	2	3	4	5
1	β -ФГ / β -PG	4,9	1,3	Г-2
2	α -ФГ / α -PG	16,8	4,8	Г-10
3	α -ФГф / α -PGf	17,9	4,8	Г-10
4	КГ / CG	15,0	5,5	Г-13
5	КГф / CGf	14,0	5,4	Г-10

Источник: авторы исследования

Данные таблицы 1 свидетельствуют, что наличие фосфорных примесей (Р-примесей) в ФГ замедляет схватывание, что особенно заметно для β -ФГ марки Г-2. Введение фибры в данном объеме не приводит к повышению марочной прочности. Кинетика набора прочности β -ФГ (рис. 3) имеет ярко выраженный двухэтапный характер. На первом этапе (1–7 суток) происходит интенсивный рост прочности за счет испарения воды и формирования структуры. Второй этап (7–60 суток)

характеризуется дальнейшим, но менее интенсивным ростом прочности при сжатии. К 60 суткам прирост составляет 384% от марочной прочности. При этом прочность при изгибе стабилизируется, что связано с завершением формирования макropористой структуры, определяющей изгибную прочность, и продолжающимся срастанием кристаллизационных контактов, повышающим прочность при сжатии.

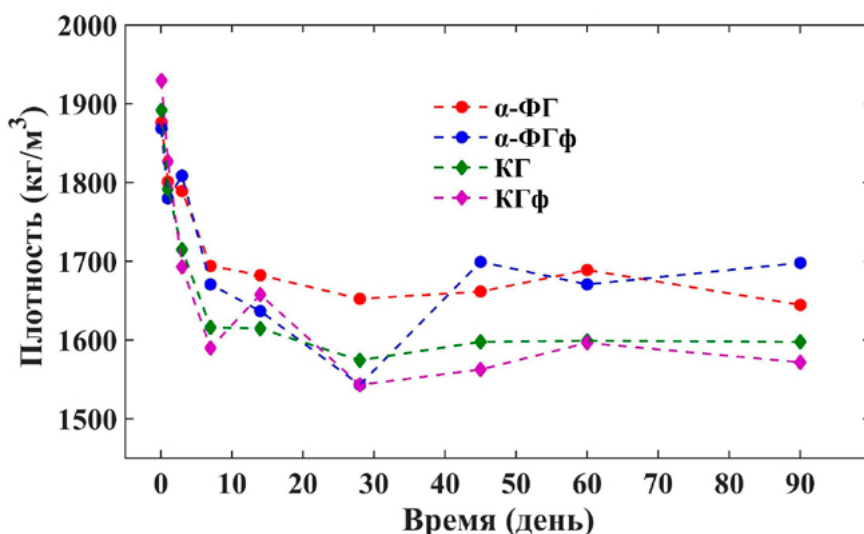


Рис. 3. Изменение во времени средней плотности затвердевших образцов из α -модификации вяжущего.

Источник: авторы исследования

Для образцов α -ФГ и α -ФГф (рис. 4, 5) также наблюдается двухэтапный набор прочности, но с иными временными границами. Интенсивный рост как на сжатие, так и на изгиб происходит до 14 суток. После 14 суток прочность при изгибе стабилизируется, тогда как прочность при сжатии продолжает возрастать до 90 суток и достигает 33,3 МПа для α -ФГ и 35,2 МПа для

α -ФГф, что соответствует приросту 99% относительно марочной. Более длительное по сравнению с коммерческим гипсом твердение α -ФГ, вероятно, обусловлено ингибирующим влиянием остаточных Р-примесей на рост кристаллитов, что замедляет, но не останавливает формирование прочной кристаллической структуры.

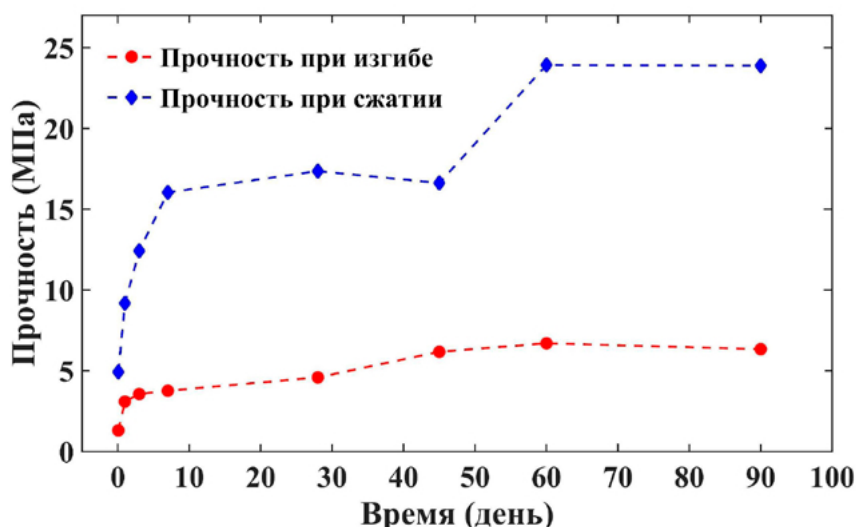


Рис. 4. Изменение во времени прочностей при изгибе и сжатии затвердевших образцов β-ФГ.
Источник: авторы исследования

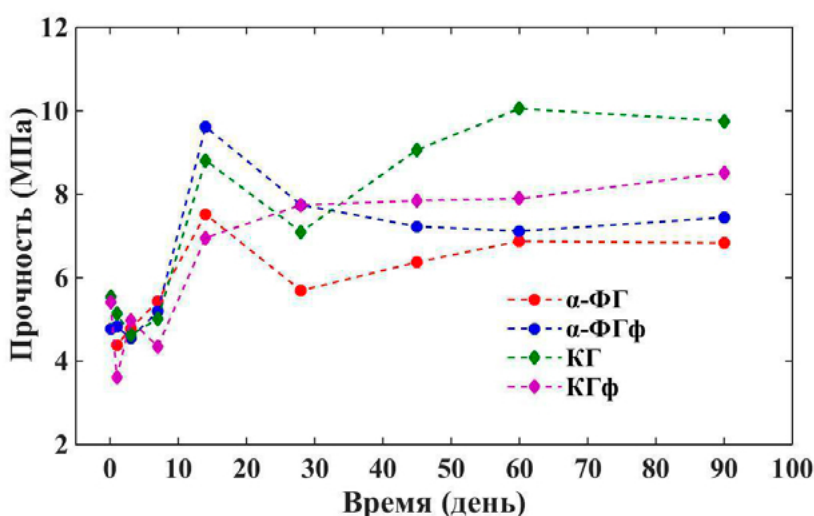


Рис. 5. Изменение во времени прочности при изгибе затвердевших образцов из α-модификации вяжущего.
Источник: авторы исследования

Важным результатом является отсутствие спадов прочности во времени для всех исследованных составов. Это свидетельствует о стабильности структуры и отсутствии значительных

внутренних напряжений, что является критическим фактором для материалов, применяемых в нагруженных элементах транспортной инфраструктуры [21, 22].

Заключение

1. Установлено, что кинетика твердения очищенного фосфогипса носит стабильный двухэтапный характер без спадов прочности. Это позволяет прогнозировать его долговременную работу в конструкциях транспортных сооружений.
2. Показано, что β-модификация фосфогипса (марка Г-2) набирает прочность в течение 60 суток. Итоговый прирост прочности на сжатие составляет 384%, что делает его пригодным для изготовления малоответственных элементов, теплоизоляционных слоев или

изделий, не требующих высокой ранней прочности.

3. α-модификация фосфогипса (марка Г-10) характеризуется длительным (до 90 суток) набором прочности, достигая к этому сроку значений 33–35 МПа. Высокая конечная прочность и предсказуемая динамика твердения позволяют рассматривать α-ФГ в качестве перспективного вяжущего для создания несущих слоев дорожных оснований, закладочных смесей при строительстве тоннелей и других элементов транспортной инфраструктуры, где важна долговечность.

4. Дисперсное армирование полипропиленовой фиброй 0,47% по массе не повышает марочную прочность фосфогипса, но влияет на кинетику влагопереноса на ранних этапах твердения.
5. Полученные результаты обосновывают целесообразность и перспективность дальнейших исследований по разработке составов и технологий применения очищенного фосфогипса в транспортном строительстве, что соответствует задачам импортозамещения и утилизации крупнотоннажных отходов.

Список литературы

1. Ферронская А. В. Гипсовые материалы и изделия (производство и применение) / под общ. ред. А. В. Ферронской. — М.: Издательство АСВ, 2004. — 488 с.
2. Bilal E., Bellefqih H., Bourgier V. [et al.] Phosphogypsum circular economy considerations: a critical review from more than 65 storage sites worldwide // *Journal of Cleaner Production*. — 2023. — Vol. 414. — 137561.
3. Maina L., Kiegiel K., Zakrzewska-Kołodziej G. Challenges and strategies for the sustainable environmental management of phosphogypsum // *Sustainability*. — 2025. — Vol. 17. — 3473.
4. Охинько В. А., Милованов В. В. Актуальные проблемы экологии и экологической безопасности и возможные пути их решения // *Инженерно-строительный вестник Прикаспия*. — 2015. — № 3(13). — С. 37–38.
5. Akfas F., Elghali A., Aboulaich A. [et al.] Exploring the potential reuse of phosphogypsum: A waste or a resource? // *Science of the Total Environment*. — 2024. — Vol. 908. — 168196.
6. Соболев Ю. Б., Абрамов А. М., Полумиев Э. В. Новые технологические подходы в производстве искусственного гипсового камня из фосфогипса // *Строительные материалы*. — 2022. — № 8. — С. 31–35.
7. Bellefqih H., Bourgier V., Bilal E. [et al.] Effect of HPO_4^{2-} and brushite on gypsum reactivity and implications for utilization of phosphogypsum in plaster production // *Journal of Cleaner Production*. — 2024. — Vol. 451. — 142013.
8. Zhang J., Cui K., Chang J., Wang L. Phosphogypsum-based building materials: Resource utilization, development, and limitation // *Journal of Building Engineering*. — 2024. — Vol. 91. — 109734.
9. Tararushkin E. V., Shchelokova T. N., Kudryavtseva V. D. A study of strength fluctuations of Portland cement by FTIR spectroscopy // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — 2020. — Vol. 919. — 022017. — DOI: 10.1088/1757-899X/919/2/022017.
10. Tararushkin E. V., Shchelokova T. N. Daily strength testing of the Portland cement mortars // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — 2020. — Vol. 862. — 022031.
11. Wei C., Gu J. Application of the industrial byproduct gypsum in building materials: A review // *Materials*. — 2024. — Vol. 17. — 1837.
12. Yang J., Dong S., Ma L. [et al.] Review on high-value utilization of phosphogypsum: Utilization of calcium and oxygen resources present in phosphogypsum // *Separation and Purification Technology*. — 2024. — Vol. 344. — 127246.
13. Wei Z., Deng Z. Research hotspots and trends of comprehensive utilization of phosphogypsum: Bibliometric analysis // *Journal of Environmental Radioactivity*. — 2022. — Vol. 242. — 106778.
14. Bumanis G., Zorica J., Bajare D., Korjakins A. Technological properties of phosphogypsum binder obtained from fertilizer production waste // *Energy Procedia*. — 2018. — Vol. 147. — P. 301–308.
15. Алфимова Н. И., Левицкая К. М., Бурьянов А. Ф. Использование фосфогипса как сырья для производства многокомпонентных вяжущих и сульфоалюминатных цементов // *Региональная архитектура и строительство*. — 2024. — № 2(59). — С. 30–46.
16. Murakami K., Tanaka H., Sato K. Procedures for the chemical analysis of impurities of phosphogypsum // *Gypsum & Lime*. — 1967. — Vol. 91. — P. 249–255.
17. Провоторов А. А., Тарарушкин Е. В. Исследование кинетики набора прочности фосфогипса // *Материаловедение, формообразующие технологии и оборудование 2025 (ICMSSTE2025): материалы международной научно-практической конференции*. — Симферополь: КФУ им. В. И. Вернадского, 2025. — С. 93–97.
18. Lyashkevich I. M., Danko G., Raptunovich G. S. Structure and properties of pressed gypsum and gypsum-cement materials // *Cement and Concrete Research*. — 1990. — Vol. 20. — P. 357–368.
19. Насиров Р., Копашева А. А., Куспанова Б. К. Анион-радикалы органических соединений // *Инженерно-строительный вестник Прикаспия*. — 2012. — № 2(3). — С. 45–48.

20. Соколова Ю. А., Морева И. В. Эффективные композиционные материалы на основе низкомарочного строительного гипса. — М.: Русайнс, 2024. — 332 с.

21. Купчикова Н. В., Антипова А. Д. Анализ региональных особенностей производства энергоэффективных строительных материалов на основе пеностекла // Инвестиции, строительство, недвижимость как материальный базис модернизации и инновационного развития экономики: материалы VI Международной научно-практической конференции: в 2 ч. — Томск: Томский государ-

ственный архитектурно-строительный университет, 2016. — С. 444–448.

22. Патент № 2669020 С1 Российская Федерация, МПК C03B32/00. Способ получения строительных изделий из шлакоситалла: № 2017127361: заявл. 31.07.2017; опубл. 05.10.2018 / Н. В. Купчикова, Р. И. Шаяхмедов, А. Д. Антипова; заявитель Государственное автономное образовательное учреждение Астраханской области высшего образования «Астраханский государственный архитектурно-строительный университет».

References

1. Ferronskaya A. V. (ed.) Gipsovye materialy i izdeliya (proizvodstvo i primeneniye) [Gypsum materials and products (production and application)]. — Moscow: ASV Publ., 2004. — 488 p. (In Russ.)

2. Bilal E., Bellefqih H., Bourgier V. et al. Phosphogypsum circular economy considerations: a critical review from more than 65 storage sites worldwide // Journal of Cleaner Production. — 2023. — Vol. 414. — Art. 137561.

3. Maina L., Kiegiel K., Zakrzewska-Koltuniewicz G. Challenges and strategies for the sustainable environmental management of phosphogypsum // Sustainability. — 2025. — Vol. 17. — Art. 3473.

4. Okhinko V. A., Milovanov V. V. Aktualnye problemy ekologii i ekologicheskoy bezopasnosti i vozmozhnye puti ikh resheniya [Current problems of ecology and environmental safety and possible solutions] // Inzhenerno-stroitelnyj vestnik Prikaspiya [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. — 2015. — No. 3 (13). — P. 37–38. (In Russ.)

5. Akfas F., Elghali A., Aboulaich A. et al. Exploring the potential reuse of phosphogypsum: A waste or a resource? // Science of the Total Environment. — 2024. — Vol. 908. — Art. 168196.

6. Sobol Yu. B., Abramov A. M., Polumiev E. V. Novye tekhnologicheskie podkhody v proizvodstve iskusstvennogo gipsovogo kamnya iz fosfogipsa [New technological approaches in the production of synthetic gypsum stone from phosphogypsum] // Stroitelnye materialy [Construction Materials]. — 2022. — No. 8. — P. 31–35. (In Russ.)

7. Bellefqih H., Bourgier V., Bilal E. et al. Effect of HPO_4^{2-} and brushite on gypsum reactivity and implications for utilization of phosphogypsum in plaster production // Journal of Cleaner Production. — 2024. — Vol. 451. — Art. 142013.

8. Zhang J., Cui K., Chang J., Wang L. Phosphogypsum-based building materials: Resource

utilization, development, and limitation // Journal of Building Engineering. — 2024. — Vol. 91. — Art. 109734.

9. Tararushkin E. V., Shchelokova T. N., Kudryavtseva V. D. A study of strength fluctuations of Portland cement by FTIR spectroscopy // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 919. — Art. 022017. — DOI: 10.1088/1757-899X/919/2/022017.

10. Tararushkin E. V., Shchelokova T. N. Daily strength testing of the Portland cement mortars // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 862. — Art. 022031.

11. Wei C., Gu J. Application of the industrial byproduct gypsum in building materials: A review // Materials. — 2024. — Vol. 17. — Art. 1837.

12. Yang J., Dong S., Ma L. et al. Review on high-value utilization of phosphogypsum: Utilization of calcium and oxygen resources present in phosphogypsum // Separation and Purification Technology. — 2024. — Vol. 344. — Art. 127246.

13. Wei Z., Deng Z. Research hotspots and trends of comprehensive utilization of phosphogypsum: Bibliometric analysis // Journal of Environmental Radioactivity. — 2022. — Vol. 242. — Art. 106778.

14. Bumanis G., Zorica J., Bajare D., Korjaksins A. Technological properties of phosphogypsum binder obtained from fertilizer production waste // Energy Procedia. — 2018. — Vol. 147. — P. 301–308.

15. Alfimova N. I., Levitskaya K. M., Buryanov A. F. Ispolzovanie fosfogipsa kak syrya dlya proizvodstva mnogokomponentnykh vyazhushchikh i sulfoaluminatnykh tsementov [Use of phosphogypsum as raw material for multicomponent binders and sulfoaluminate cements] // Regionalnaya arkhitektura i stroitelstvo [Regional Architecture and Construction]. — 2024. — No. 2 (59). — P. 30–46. (In Russ.)

16. Murakami K., Tanaka H., Sato K. Procedures for the chemical analysis of impurities of

phosphogypsum // Gypsum & Lime.— 1967.— Vol. 91.— P. 249–255.

17. Provotorov A. A., Tararushkin E. V. Issledovanie kinetiki nabora prochnosti fosfogipsa [Study of phosphogypsum strength development kinetics] // Materialovedenie, formoobrazuyushchie tekhnologii i oborudovanie 2025 (ICMSSTE2025): Proceedings.— Simferopol: V.I. Vernadsky Crimean Federal University Publ., 2025.— P. 93–97. (In Russ.)

18. Lyashkevich I. M., Danko G., Raptunovich G. S. Structure and properties of pressed gypsum and gypsum-cement materials // Cement and Concrete Research.— 1990.— Vol. 20.— P. 357–368.

19. Nasirov R., Kopasheva A. A., Kuspanova B. K. Anion-radikaly organicheskikh soedinenij [Anion radicals of organic compounds] // Inzhenerno-stroitelnyy vestnik Prikaspiya.— 2012.— No. 2 (3).— P. 45–48. (In Russ.)

20. Sokolova Yu. A., Moreva I. V. Effektivnye kompozitsionnye materialy na osnove nizkoma-

rochnogo stroitel'nogo gipsa [Effective composite materials based on low-grade gypsum].— Moscow: Rusajns Publ., 2024.— 332 p. (In Russ.)

21. Kupchikova N. V., Antipova A. D. Analiz regionalnykh osobennostej proizvodstva energo-effektivnykh stroitelnykh materialov na osnove penostekla [Analysis of regional features of energy-efficient building materials based on foam glass] // Investitsii, stroitelstvo, nedvizhimost kak materialnyy bazis modernizatsii i innovatsionnogo razvitiya ekonomiki: Proceedings.— Tomsk: TSUAB Publ., 2016.— P. 444–448. (In Russ.)

22. Kupchikova N. V., Shayakhmedov R. I., Antipova A. D. Sposob polucheniya stroitelnykh izdelij iz shlakositalla [Method for producing construction products from slag sitall].— Patent RF No. 2669020 C1, IPC C03B32/00.— Filed 31.07.2017; publ. 05.10.2018.— Applicant: Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering. (In Russ.)

Сведения об авторах	Information about the authors
Тарарушкин Евгений Викторович кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Здания и сооружения на транспорте» ФГБОУ ВО Российского университета транспорта (РУТ МИИТ) Адрес: Российский университет транспорта (РУТ МИИТ), 127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9 ORCID: 0000–0002–2374–5801 E-mail: evgeny.tararushkin@yandex.ru	Tararushkin Evgeny Viktorovich Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Buildings and Structures in Transport, Russian University of Transport (RUT MIIT) Address: Russian University of Transport (RUT MIIT), 9/9 Obratsova Street, Moscow, 127994, Russia ORCID: 0000–0002–2374–5801 E-mail: evgeny.tararushkin@yandex.ru
Провоторов Алексей Александрович аспирант кафедры «Строительные материалы и технологии» ФГБОУ ВО Российского университета транспорта (РУТ МИИТ) Адрес: Российский университет транспорта (РУТ МИИТ), 127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9 ORCID: 0000–0003–0190–5672 E-mail: prov40@mail.ru	Provotorov Alexei Alexandrovich Postgraduate Student, Department of Construction Materials and Technologies, Russian University of Transport (RUT MIIT) Address: Russian University of Transport (RUT MIIT), 9/9 Obratsova Street, Moscow, 127994, Russia ORCID: 0000–0003–0190–5672 E-mail: prov40@mail.r

Статья получена 23.01.2026 | статья опубликована 25.03.2026

Article received 23.01.2026 | Article published 25.03.2026

УДК 004.89:004.75:656.021.8

КЛАССИФИКАЦИЯ УРОВНЕЙ ПОДКЛЮЧЕННОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АГЕНТОВ И КОММУНИКАЦИОННЫХ ПАТТЕРНОВ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ

А. В. Белов*ГУП «Московский метрополитен»**ФГАОУ ВО Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»*

Аннотация. В статье предлагается классификация уровней подключенности транспортных средств, ориентированная на задачи управления дорожным движением. Классификация включает 6 уровней (0–5) с подуровнями (а и б) и основана на комбинации двух ключевых измерений: адресности и режима участия в управлении. Предложенная градация уровней подключенности эквивалентна этапам эволюции коммуникационных архитектур распределенных вычислительных систем — от широковещания к полной оркестрации агентов. Такое соответствие позволяет переносить результаты из области распределенных систем (масштабируемость, отказоустойчивость, согласованность) на задачи проектирования архитектур систем управления транспортными потоками. Методологический выбор линейного подхода с фасетным подкреплением обоснован через систематическое сравнение четырех подходов к классификации по пяти критериям качества.

Ключевые слова: подключенные транспортные средства, классификация, мультиагентные системы, распределенные системы, коммуникационные паттерны, управление дорожным движением, V2X.

UDC 004.89:004.75:656.021.8

CLASSIFICATION OF VEHICLE CONNECTIVITY LEVELS BASED ON AGENT INTERACTION MODELS AND COMMUNICATION PATTERNS OF DISTRIBUTED SYSTEMS

A. V. Belov*SUE Moscow Metro**HE University MIEM*

Abstract. This article proposes a classification of vehicle connectivity levels oriented towards traffic management tasks. The classification comprises 6 levels (0–5) with sub-levels (a and b) and is based on a combination of two key dimensions: addressability and mode of participation in management. The proposed connectivity level gradation is equivalent to the stages of evolution of communication architectures in distributed computing systems — from broadcasting to full agent orchestration. This correspondence enables the transfer of results from the field of distributed systems (scalability, fault tolerance, consistency) to the design of traffic flow management system architectures. The methodological choice of a linear approach with faceted reinforcement is justified through a systematic comparison of four classification approaches across five quality criteria.

Keywords: connected vehicles, classification, multi-agent systems, distributed systems, communication patterns, traffic management, V2X.

Введение

Стандарт SAE J3016 [1] предоставил транспортной отрасли общепринятую классификацию уровней автоматизации вождения, которая стала универсальным языком для индустрии, регуляторов и исследователей. Однако аналогичной общепринятой классификации для подключенности транспортных средств (ТС) не существует, несмотря на то что именно подключенность определяет возможности координации транспортного потока и, как следствие, системную эффективность функционирования улично-дорожной сети (УДС).

Имеющиеся классификации рассматривают подключенность, как правило, через призмы, лишь косвенно затрагивающие задачи управления движением: Privacy4Cars [2] — с позиций типов передаваемой информации и защиты персональных данных, McKinsey C3X [3] — с позиции пользовательского опыта. Обзоры стандартов V2X-коммуникаций [4] типизируют каналы связи (V2V, V2I, V2N и пр.), но не функциональные возможности участия ТС в координированном управлении. Попытка построить единую онтологию подключенного автомобиля [5] также не привела к созданию классификации, ориентированной на управление потоками.

Вместе с тем, если рассматривать ТС как автономного агента в распределенной системе

управления дорожным движением, то задача классификации уровней подключенности естественно ложится в область информатики: она сводится к определению моделей взаимодействия агента с управляющей системой и другими агентами. Взгляд с этой точки зрения позволяет опереться на обширный корпус знаний о коммуникационных паттернах распределенных систем [6], архитектурах мультиагентных систем [7, 8] и формальных моделях координации [9].

Ранее автором был предложен подход «управления формированием транспортных потоков» (УФТП) [10, 11] как совокупность управляющих воздействий на отдельные ТС с целью минимизации издержек конкурентного использования дорожной сети. Данный подход предполагает градацию от простого информирования водителей к оркестрации траекторий движения, что непосредственно связано с уровнем подключенности.

Целью настоящей работы является разработка формально обоснованной классификации уровней транспортной подключенности, основанной на моделях взаимодействия агентов, и демонстрация ее изоморфизма (структурного сходства) с эволюцией коммуникационных паттернов распределенных вычислительных систем.

Обзор литературы

Классификации подключенности транспортных средств

Систематический анализ литературы выявил несколько подходов к классификации подключенности ТС. Первый подход, ориентированный на данные, представлен классификацией Privacy4Cars [2], которая определяет пять уровней в зависимости от объема собираемых и передаваемых персональных данных. Второй, ориентированный на пользователя, реализован в модели McKinsey C3X [3], описывающей четыре уровня качества цифрового опыта водителя. Третий ориентирован на каналы связи и представлен в обзорах стандартов V2X [4], типизирующих физические каналы (V2V, V2I, V2N, V2C и др.). В европейских странах получил развитие подход, при котором уровни присваиваются не автомобилю, а участкам дорожной сети — шкала ISAD (Infrastructure Support levels for Automated Driving). Уровни ISAD описывают, какую инфраструктурную поддержку может ожидать автоматизированное транспортное средство на данном участке, и в перспективе могут быть расширены

для охвата функций управления трафиком и кооперативных маневров. Таким образом, ни один из этих подходов не отвечает на вопрос: какие управляющие воздействия возможны при данном уровне подключенности, какой уровень координации между ТС и системой управления достигим.

Коммуникационные паттерны распределенных систем

В теории распределенных вычислительных систем сложилась устоявшаяся типология коммуникационных паттернов [6]. Широковещание («broadcast») обеспечивает одностороннюю доставку сообщений неопределенному кругу получателей. Архитектура «клиент–сервер» реализует запрос-ответное взаимодействие с идентификацией клиента. Паттерн «издатель–подписчик» («publish-subscribe») [12] обеспечивает асинхронную доставку сообщений без прямой связи между источником и потребителем. Одноранговые сети (P2P) с координатором сочетают прямое взаимодействие между узлами с централизованной функцией согласования. Наконец, паттерн оркестрации

предполагает централизованное управление поведением узлов, где координатор назначает задачи и контролирует исполнение, подобно тому, как системы оркестрации контейнеров управляют жизненным циклом вычислительных единиц [6].

Такая градация от ширококовещания к оркестрации отражает нарастание степени координации, требований к идентификации узлов и гарантий доставки. Как будет показано далее, аналогичную градацию можно выстроить в отношении подключенности ТС.

Мультиагентные системы и координация

Мультиагентная система (МАС)— это распределенная вычислительная система, состоящая из автономных агентов, взаимодействующих для достижения индивидуальных или общих целей [7]. В контексте управления дорожным движением каждое ТС может рассматриваться как агент, а система управления — как координатор или оркестратор. Как отмечается в [8], ключевым свойством МАС является модель координации: от полностью децентрализованной (каждый агент действует автономно) до централизованно управляемой (координатор определяет действия каждого агента). В [9] выделяется спектр форм координации — от информационной (обмен данными) через консультативную (рекомендации)

к директивной (управляющие команды). Именно такую градацию форм координации между агентом (ТС) и координатором (системой управления) представляется целесообразным положить в основу предлагаемой классификации.

Подключенность и эффективность управления движением

Исследования последних лет убедительно подтверждают значимость даже минимальной подключенности. В работе [13] показано, что GPS-данные от 6–10% автомобилей позволяют оптимизировать светофорные циклы и снизить число остановок на 20–30%. В [14] значительные улучшения наблюдались при 5–10% проникновении подключенных ТС на магистралях. Теоретический анализ [15, 16] показывает, что полная координация (системно-оптимальное распределение по Уордропу [17]) может снизить суммарные задержки в 2–3 раза по сравнению с «эгоистическим» распределением. При этом технологии полного V2X (DSRC, C–V2X) требуют значительных инвестиций в дорожную инфраструктуру [19, 20]. Значительность эффекта от минимальной подключенности и сложность повсеместного внедрения V2X повышают актуальность задачи классификации уровней подключенности как инструмента оценки и обоснования мероприятий по повышению уровня координации.

Методология построения классификации

Анализ подходов к классификации

При разработке классификации необходимо выбрать подход, обеспечивающий достаточную научную строгость и высокую практическую

применимость. Следуя методологии построения таксономий (иерархических классификаций) в программной инженерии [18], рассматриваются четыре подхода (табл. 1).

Таблица 1

Сравнение подходов к классификации

№ п/п	Подход	Принцип	Достоинства	Ограничения
1	2	3	4	5
1	Иерархический	Вложенные категории по общим существенным признакам	Четкая структура; наследование свойств	Ригидность; единственная иерархия
2	Фасетный	Независимые измерения; объект классифицируется по каждому	Гибкость; многомерность	Отсутствие естественного упорядочения
3	Ординальный (порядковый)	Линейная прогрессия уровней возрастающей сложности	Интуитивность; пороговые требования	Риск упрощения многомерных объектов
4	Кластерный	Группировка по сходству статистическими методами	Объективность; основан на данных	Требует количественных данных; произвольность границ

Источник: автор исследования

Обоснование выбора подхода классификации

В качестве основного подхода выбрана порядковая линейная классификация с фасетным подкреплением. Обоснование включает следующие аргументы. Во-первых, аналогия с SAE J3016 [1] обеспечивает концептуальную когерентность и возможность перекрестного сопоставления двух независимых измерений — автоматизации и подключенности. Во-вторых, подключенность для задач управления движением демонстрирует естественную градацию — от отсутствия обмена данными до полной оркестрации траекторий, где каждый уровень расширяет возможности предыдущего. В-третьих, инженеры и регуляторы знакомы с линейными системами (SAE, CMMI, NIST). В-четвертых, такая шкала обеспечивает возможность бенчмаркинга городов и транспортных коридоров.

Для преодоления ключевого ограничения

линейного подхода, а именно риска чрезмерного упрощения, каждый уровень формально характеризуется по 8 независимым измерениям (фасетам), что обеспечивает строгость и воспроизводимость.

Классификационные измерения

В качестве фасетов для классификации определены 8 измерений (табл. 2). Измерения И5 (Адресность) и И6 (Режим участия в управлении) являются первичными дескрипторами: именно их комбинация однозначно определяет уровень. Измерение И7 (коммуникационная модель) устанавливает связь с паттернами распределенных систем. Остальные измерения выполняют описательную и верификационную функции.

Таблица 2

Классификационные измерения

№ п/п	#	Измерение	Описание	Шкала
1	2	3	4	5
1	И1	Направленность	от ТС, к ТС или двусторонний обмен	исходящий → входящий → двусторонний
2	И2	Непрерывность	характер связи во времени	дискретная → периодическая → непрерывная
3	И3	Задержка	максимально допустимая латентность	минуты → секунды → миллисекунды
4	И4	Идентификация	различимость отдельных ТС	нет → агрегат → анонимный ID → постоянный ID
5	И5*	Адресность	возможность адресного обращения к ТС	нет → широковещание → групповая → индивидуальная → персональная
6	И6*	Режим участия в управлении	какую роль играет ТС в процессе управления	пассивное получение → передача данных → получение рекомендаций (+ верификация) → исполнение предписаний → полное подчинение
7	И7	Коммуникационная модель	соответствующий паттерн распределенной системы	Broadcast → Pub/Sub → Client-Server → RPC → Edge → P2P + координатор → Оркестрация
8	И8	Полнота данных	объем обмениваемых данных	позиция → телематика → сенсорные данные

Источник: автор исследования

* Примечание: И5 и И6 — первичные дескрипторы уровней.

Под индивидуальной адресностью понимается возможность обращения к конкретному устройству (смартфон, бортовое устройство) без постоянной привязки к транспортному средству: система адресует аккаунт пользователя или сессию, но не идентифицирует ТС. Под персо-

нальной адресностью понимается обращение к конкретному идентифицированному ТС с постоянным идентификатором (VIN, телематический профиль), позволяющим системе вести историю взаимодействия и учитывать параметры конкретного ТС.

Критерии качества

Классификация оценивается по пяти критериям качества таксономий в программной инженерии [18]:

1. ортогональность — взаимная исключительность уровней;
2. полнота — покрытие всего спектра существующих и перспективных систем;
3. монотонность — строгое возрастание функций

4. прагматическая полезность — применимость для проектных и инвестиционных решений;
5. воспроизводимость — однозначность отнесения реальной системы к уровню независимыми экспертами.

Верификация этих критериев представлена в разделе «Результаты».

Результаты

Определение уровней

Классификация определяет 6 основных уровней (Ур.0–Ур.5) с подуровнями (а/б) для функциональных вариантов внутри одного яруса.

Каждый уровень характеризуется уникальной комбинацией значений И5 (Адресность) и И6 (Режим участия в управлении), что гарантирует ортогональность классификации (табл. 3).

Таблица 3

Уровни подключенности транспортных средств

№ п/п	Ур.	Название	Описание	И5	И6
1	2	3	4	5	6
2	0a	Информированный по радио	водитель получает общую информацию из центра управления по радио	широковещательный	пассивное получение информации
3	0б	Информированный знаками	водитель получает общую информацию со знаков переменной информации	групповой	пассивное получение информации
4	1a	Телематически наблюдаемый (событийно)	система связи односторонне и событийно передает информацию (бортовая телематика производителей, ЭРА-ГЛОНАСС)	индивидуальный	передача данных
5	1б	Телематически наблюдаемый (непрерывно)	автомобиль передает телематические данные (позиция, скорость) с бортового устройства	индивидуальный	передача данных
6	2a	Опосредованный смартфоном	детализированная информация через смартфон (навигация, маршруты), система не знает, выполнена ли рекомендация	индивидуальный	получение рекомендаций
7	2б	Телематически подключенный	адресные рекомендации по скорости, маршруту, времени на идентифицированное устройство	персональный	получение и верификация рекомендаций
8	3a	Связанный с инфраструктурой (облачный)	Ур.2 + прием данных от облачной инфраструктуры (фазы светофора, метеоусловия и др.)	персональный	получение и верификация рекомендаций
9	3б	Связанный с инфраструктурой (периферийный)	Ур.3a + придорожный узел RSU/МЕС вычисляет команду локально и передает ее ТС с минимальной задержкой; открывает класс задач управления в реальном времени (скоростной коридор, проезд на зеленый)	персональный	исполнение предписаний

№ п/п	Ур.	Название	Описание	И5	И6
1	2	3	4	5	6
10	4а	Сетевой кооперативный	обмен с центром управления, инфраструктурой и другими ТС без жестких требований к задержке, тактическое согласование происходит P2P между ТС в реальном времени	персональный	исполнение предписаний
11	4б	Сетевой коллективный	Ур.4а + передача данных бортовых сенсоров (камера, лидар)	персональный	исполнение предписаний
12	5а	Оркестрированный кооперативный	ТС включается в динамическую модель движения; траектория назначается системой с регламентированной задержкой; ТС не принимает самостоятельных решений о тактических параметрах движения	персональный	полное подчинение
13	5б	Оркестрированный коллективный	Ур.5а + сенсорные данные всех ТС формируют единую модель мира для оркестратора; коллективное восприятие окружения обеспечивает назначение траекторий с учетом полной картины среды	персональный	полное подчинение

Источник: автор исследования

Изоморфизм с коммуникационными паттернами распределенных систем

Важным свойством предлагаемой классификации является то, что градация уровней подключенности ТС структурно соответствует эволюции коммуникационных моделей в распределенных вычислительных системах (табл. 4). В обоих

случаях градация определяется нарастанием требований к точности идентификации узлов, адресности сообщений, гарантиям доставки и степени централизации управления.

Таблица 4

Соответствие уровней подключенности коммуникационным моделям

№ п/п	Ур.	Коммуникационная модель	Транспортная аналогия	Топология	Ключевые свойства
1	2	3	4	5	6
2	0	широковещание (broadcast)	радио, ЗПИ	один-ко-многим, без обратной связи	без идентификации получателей; минимальная латентность не требуется
3	1	издатель–подписчик (pub/sub)	ТС → платформа данных	многие-к-одному через брокера	асинхронная доставка; слабая связанность; масштабируемость публикации
4	2	клиент–сервер + RPC с идентификацией	смартфон или бортовое устройство — сервер навигации	звезда (клиент — сервер)	идентификация клиента; запрос-ответ; на Ур.2б — двусторонний адресный обмен с верификацией исполнения; масштабируемость через реплицирование сервера
5	3	двусторонний RPC с идентификацией + периферийные вычисления (Edge)	ТС ↔ центр управления + RSU как периферийный узел	звезда с адресацией	персонализация; гарантия доставки; идемпотентность операций (повторное выполнение без изменения результата). На Ур.3а: вычисление в облаке; на Ур.3б: RSU вычисляет локально

№ п/п	Ур.	Коммуникационная модель	Транспортная аналогия	Топология	Ключевые свойства
1	2	3	4	5	6
6	4	P2P с координатором	V2V между ТС + координатор (ЦУ)	смешанная: P2P + координатор	координатор задает параметры, тактическое согласование — P2P; устойчивость к отказам узлов; на Ур.4б добавляется коллективное восприятие (сенсорные данные)
7	5	централизованная оркестрация (Kubernetes для контейнеров)	коллективное восприятие и динамическое управление траекториями	полная звезда с управлением	назначение задач; контроль полного цикла поездки; гарантированная задержка

Источник: автор исследования

Изоморфизм проявляется не только в топологии, но и в ключевых свойствах каждого уровня. На Ур.0 система не различает отдельных получателей — аналогично широковещательной передаче, где сообщение адресовано всем без идентификации. На Ур.1 ТС выступает в роли издателя телематических данных, а система управления — в роли подписчика, что в точности соответствует паттерну «издатель–подписчик» [12]: масштабируемость определяется пропускной способностью брокера, а не числом издателей. На Ур.2 появляется идентификация конкретного «клиента» (смартфона на Ур.2а, бортового устройства ТС на Ур.2б) и возможность адресного ответа — классический паттерн «клиент–сервер»; на Ур.2б взаимодействие приобретает характер двустороннего адресного обмена с верификацией исполнения, что соответствует механизму удаленного вызова процедур (RPC) с подтверждением. На Ур.3 в цепочку обмена включается инфраструктурный объект как источник данных реального времени: на Ур.3а вычисление выполняется в облаке (задержка порядка нескольких секунд), на Ур.3б придорожный узел RSU/MEC обрабатывает данные локально с задержкой в доли секунды, открывая класс задач управления в реальном времени, — этот подход соответствует архитектуре периферийных вычислений («Multi-access Edge Computing», MEC). На Ур.4 ТС обмениваются данными не только с центральной системой, но и напрямую друг с другом (V2V), что формирует одноранговую сеть с координатором, подобную распределенным системам согласования. На Ур.5 система полностью определяет траекторию каждого ТС — это паттерн централизованной оркестрации, где каждый агент подчинен координирующей инстанции.

Установленное соответствие позволяет сформулировать ряд теоретических следствий. Во-первых, к каждому уровню подключенности применимы результаты анализа соответствующего коммуникационного паттерна. Так, для Ур.1 (издатель–подписчик) масштабируемость определяется пропускной способностью брокера, а не числом издателей — это объясняет, почему даже 6–10% подключенных ТС дают значительный эффект [13].

Во-вторых, переход к Ур.4–Ур.5 порождает проблемы, хорошо изученные в теории распределенных систем. Теорема CAP, или теорема Брюера (согласованность–доступность–устойчивость к разделению) [6], утверждает, что распределенная система не может одновременно обеспечить все три свойства. Применительно к Ур.5 это означает, что при разрыве связи (устойчивость к разделению) система должна выбирать между точным выполнением назначенных траекторий (согласованность) и продолжением движения по автономному решению ТС (доступность). Данный компромисс формализует известную практическую проблему выбора вариантов поведения автоматизированных ТС при потере связи с системой управления.

В-третьих, градация моделей координации от информационной к директивной (по [9]) точно соответствует шкале Иб: пассивное получение информации (Ур.0) → передача данных (Ур.1) → получение рекомендаций (Ур.2а) → верифицируемые рекомендации (Ур.2б–3а) → исполнение предписаний (Ур.3б, кооперативные предписания на Ур.4) → полное подчинение (Ур.5). Это подтверждает, что предложенная классификация не является произвольной, а отражает фундаментальные принципы и формы координации в мультиагентных системах.

Обсуждение

Верификация критериев качества

Ортогональность обеспечивается тем, что каждый уровень определяется уникальной комбинацией И5 × И6: ни один реальный сценарий не может быть отнесен к двум уровням одновременно. Полнота подтверждается покрытием всего спектра — от отсутствия подключения до полной оркестрации с коллективным восприятием; промежуточных состояний, не покрываемых классификацией, при анализе существующих и перспективных систем выявлено не было (табл. 5). Монотонность вытекает из строгого возрастания значений обоих первич-

ных измерений (И5 и И6) от уровня к уровню. Практическая полезность обоснована соотношением уровней с конкретными стратегиями управления и известными коммуникационными паттернами. Воспроизводимость обеспечивается формальным характером классификационных измерений, отнесение системы к уровню определяется объективно проверяемыми свойствами (наличие или отсутствие адресации, тип управляющего воздействия), а не экспертной оценкой.

Таблица 5

Примеры разделения существующих систем по уровням подключенности

№ п/п	Ур.	Примеры реальных систем	Масштаб внедрения
1	2	3	4
1	0a	TMC/RDS (Traffic Message Channel через FM-радио), Highway Advisory Radio (HAR, США), радиоинформирование от центров управления движением	повсеместно
2	0б	знаки переменной информации (ЗПИ / VMS / DMS), управляемые дорожные знаки (переменное ограничение скорости на магистралях)	широко: магистрали, крупные города
3	1a	eCall (ЕС, обязателен с 2018), ЭРА-ГЛОНАСС (ЕАЭС, обязателен с 2017 для новых ТС), GM OnStar (базовый — оповещение об аварии), OBD-II aftermarket трекеры в событийном режиме	13+ млн ТС в РФ; обязательно для всех новых ТС ЕС/ЕАЭС
4	1б	BMW ConnectedDrive / CarData, Mercedes me connect, Toyota Connected Services, GM OnStar (расширенный), fleet-трекеры (Wialon, Omnicomm), FCD от смартфонов через Waze / Google Maps / Яндекс	десятки млн (OEM); 140+ млн (Waze); сотни млн (Google Maps)
5	2a	Яндекс.Навигатор, Google Maps, Waze, 2ГИС, Apple Maps — навигация с учетом трафика через смартфон водителя	сотни миллионов пользователей
6	2б	Audi Traffic Light Information (ATLI) через LTE/облако; DENSO MobiQ; fleet-системы с адресными рекомендациями водителям (Samsara, Geotab); Яндекс.Авто с интегрированной навигацией на бортовом экране	пилотные проекты; единицы тысяч ТС
7	3a	Audi ATLI через облако (V2N): фазы светофора доставляются на бортовой дисплей через сотовую сеть; Verizon Edge Transportation Exchange (через 5G/LTE); облачные платформы передачи SPaT без RSU	пилотные проекты в США и Европе
8	3б	GLOSA (Green Light Optimal Speed Advisory) через RSU/DSRC: пилоты в Бирмингеме (UK, A45), Тренто (Италия); SPaT через DSRC/C-V2X; Fulton County, GA: школьные автобусы с C-V2X, приоритет на 62 светофорах — снижение числа остановок на 40%, времени в пути на 13%	десятки пилотов; тысячи ТС
9	4a	V2V через DSRC: пилоты THEA (Тампа, FL), Indiana DOT (оснащенные грузовики), Wyoming DOT (снегоуборщики); C-V2X Sidelink (PC5) в Китае (интеграция в новые ТС); Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC); грузовой платунинг (Peloton Technology, DAF/MAN/Volvo, Европа)	единичные пилоты; сотни-тысячи ТС
10	4б	Cooperative Perception: стандарт ETSI TS103 324 (2023), Collective Perception Messages (CPM); агрегация данных лидаров и камер через MEC-серверы	лабораторные прототипы; стандарт принят

№ п/п	Ур.	Примеры реальных систем	Масштаб внедрения
1	2	3	4
11	5a	концепции: Waymo + городская инфраструктура (координация маршрутов через облако); проекты «умных дорог» в Китае (Xiong'an, Changsha) с интеграцией ТС в динамическую модель; Mobility-as-a-Service с назначением маршрутов	прототипы; ограниченные пилоты
12	5б	полное коллективное восприятие + централизованная оркестрация траекторий на основе единой модели мира: теоретическая целевая архитектура	не реализовано; целевой горизонт

Источник: автор исследования

Классификация уровней подключенности ТС в контексте SAE J3016

Уровни автоматизации (SAE0–5) и уровни подключенности (Ур.0–Ур.5) представляют собой два ортогональных измерения. В терминах мультиагентных систем [7], автоматизация — это свойство исполнительного механизма агента, подключенность — свойство его коммуникационного интерфейса. Автомобиль с высокой автоматизацией (SAE4,5) может иметь минимальную подключенность, и наоборот, управляемое человеком ТС может иметь 5-й уровень подключенности. Таким образом, автоматизация определяет способность ТС исполнять управляющие команды, тогда как подключенность определяет возможность получать эти команды и участвовать в координации. Без подключенности автоматизированное ТС остается изолированным агентом, действующим в собственных интересах — «эгоистическим» в терминологии теории игр [10].

Заключение

Предложенная классификация уровней транспортной подключенности обосновывает перенос архитектурных решений, паттернов отказоустойчивости и моделей масштабирования из области распределенных систем [6, 21] на задачи проектирования транспортных коммуникационных платформ.

Классификация удовлетворяет пяти критериям качества (ортогональность, полнота, монотонность, прагматическая полезность, воспроизводимость) и может служить основой для разработки дорожной карты цифровой трансформации управления дорожным движением, а также для проектирования коммуникационных

Практическое значение для проектирования систем управления движением

Установленный изоморфизм имеет прямое инженерно-практическое значение для проектирования коммуникационной архитектуры транспортной системы. Для каждого целевого уровня подключенности разработчик может обратиться к обширному корпусу решений для соответствующего паттерна распределенной системы: брокеры сообщений и протоколы MQTT для Ур.2, архитектуры МЕС для Ур.3, протоколы согласования для Ур.4, системы оркестрации для Ур.5. Это существенно снижает риски проектирования и позволяет повторно использовать проверенные архитектурные решения.

Кроме того, классификация позволяет упорядочить шаги цифровой трансформации в области организации и управления дорожным движением. Города могут начинать с Ур.1–Ур.2, используя существующую сотовую инфраструктуру и навигационные приложения, проектируя при этом архитектуру под целевой Ур.5 с поэтапным наращиванием функций управления.

архитектур транспортных систем.

Направления дальнейших исследований включают:

- количественное моделирование зависимости эффективности от уровня подключенности;
- исследование влияния смешанных потоков (с различными уровнями подключенности) на пропускную способность;
- разработку архитектуры системы управления дорожным движением для поэтапного перехода от Ур.1 к Ур.5;
- разработку комплексной методологии внедрения высокоавтоматизированного и подключенного транспорта в городах.

Список литературы

1. SAE J3016_202104. Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles. — SAE International, 2021.
2. P4C's Five Levels of Vehicle Connectivity [Электронный ресурс] // Privacy4Cars. — 2022. — URL: <https://privacy4cars.com/data-in-cars/p4cs-five-levels-of-vehicle-connectivity/> (дата обращения: 27.01.2026).
3. Setting the framework for car connectivity and user experience: the C3X framework [Электронный ресурс] // McKinsey & Company. — 2018. — URL: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/setting-the-framework-for-car-connectivity-and-user-experience> (дата обращения: 27.01.2026).
4. Zhang X. et al. Vehicle-to-Everything Communication in Intelligent Connected Vehicles: A Survey and Taxonomy // *Automotive Innovation*. — 2025. — Vol. 8. — Art. 3. — DOI: 10.1007/s42154-024-00310-2.
5. Baumann D., Sommer M., Dettinger F., Rösch T., Weyrich M., Sax E. Connected Vehicle: Ontology, Taxonomy and Use Cases // *2024 IEEE International Systems Conference (SysCon)*. — Montreal, 2024. — P. 1–6. — DOI: 10.1109/SysCon61195.2024.10553586.
6. Van Steen M., Tanenbaum A. S. *Distributed Systems*. — 4th ed. — distributed-systems.net, 2023.
7. Wooldridge M. *An Introduction to MultiAgent Systems*. — 2nd ed. — Chichester: John Wiley & Sons, 2009. — 484 p.
8. Городецкий В. И., Грушинский М. С., Хабалов А. В. Многоагентные системы: обзор // *Новости искусственного интеллекта*. — 1998. — № 2. — С. 64–96.
9. Тарасов В. Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. — М.: Эдиториал УРСС, 2002. — 352 с.
10. Белов А. В. Повышение эффективности использования улично-дорожных сетей на основе управления формированием транспортных потоков: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01. — Москва, 2014. — 134 с.
11. Белов А. В., Бутенко Ю. В. Анализ возможности и перспектив достижения системно-оптимального распределения транспортных потоков с появлением подключенных и высокоавтоматизированных транспортных средств // *Мир транспорта и технологических машин*. — 2025. — № 1–3(88). — С. 120–129. — DOI: 10.33979/2073-7432-2025-1-3(88)-120-129.
12. Eugster P. Th., Felber P. A., Guerraoui R., Kermarrec A. — M. The many faces of publish/subscribe // *ACM Computing Surveys*. — 2003. — Vol. 35. — No. 2. — P. 114–131.
13. Jerome Z., Ren Y., Liu H. et al. Traffic light optimization with low penetration rate vehicle trajectory data // *Nature Communications*. — 2024. — Vol. 15. — Art. 1306.
14. Cetin M. et al. Active bottleneck management on freeways through connected vehicle technology. — NTC, University of Maryland, 2018.
15. Roughgarden T., Tardos E. How bad is selfish routing? // *Journal of the ACM*. — 2002. — Vol. 49. — No. 2. — P. 236–259.
16. Small K. The Bottleneck Model: An Assessment and Interpretation // *Economics of Transportation*. — 2015. — Vol. 4. — No. 1–2. — P. 110–117.
17. Wardrop J. G. Some theoretical aspects of road traffic research // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. — 1952. — Vol. 1. — P. 325–378.
18. Usman M. et al. Taxonomies in software engineering: A systematic mapping study and a revised taxonomy development method // *Information and Software Technology*. — 2017. — Vol. 85. — P. 43–59.
19. Gomez A. E. et al. Cooperative Intelligent Transport Systems: The Impact of C-V2X Communication Technologies // *Electronics*. — 2025. — Vol. 14. — No. 7. — Art. 1279.
20. ПНСТ 633–2022. Интеллектуальные транспортные системы. Кооперативные адаптивные системы круиз-контроля. Требования к эксплуатационным характеристикам и методы испытания. — М.: Стандартинформ, 2022.
21. Швецов А. Н. Распределенные интеллектуальные информационные системы. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. — 180 с.

References

1. SAE J3016_202104. Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles. — SAE International, 2021.
2. P4C's Five Levels of Vehicle Connectivity. — Privacy4Cars, 2022. — Available at: <https://privacy4cars.com/data-in-cars/p4cs-five-levels-of-vehicle-connectivity/> (accessed: 27.01.2026).

3. Setting the framework for car connectivity and user experience: the C3X framework.—McKinsey & Company, 2018.—Available at: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/setting-the-framework-for-car-connectivity-and-user-experience> (accessed: 27.01.2026).
4. Zhang X. et al. Vehicle-to-Everything Communication in Intelligent Connected Vehicles: A Survey and Taxonomy // *Automotive Innovation*.— 2025.— Vol. 8.— Art. 3.— DOI: 10.1007/s42154-024-00310-2.
5. Baumann D., Sommer M., Dettinger F., Rösch T., Weyrich M., Sax E. Connected Vehicle: Ontology, Taxonomy and Use Cases // *2024 IEEE International Systems Conference (SysCon)*.— Montreal, 2024.— P. 1–6.— DOI: 10.1109/SysCon61195.2024.10553586.
6. Van Steen M., Tanenbaum A. S. *Distributed Systems*.— 4th ed.— distributed-systems.net, 2023.
7. Wooldridge M. *An Introduction to MultiAgent Systems*.— 2nd ed.— Chichester: John Wiley & Sons, 2009.— 484 p.
8. Gorodetskij V. I., Grushinskij M. S., Khabalov A. V. Mnogoagentnye sistemy: obzor [Multi-agent systems: a review] // *Novosti iskusstvennogo intellekta [Artificial Intelligence News]*.— 1998.— No. 2.— P. 64–96. (In Russ.)
9. Tarasov V. B. Ot mnogoagentnykh sistem k intellektualnym organizatsiyam: filosofiya, psikhologiya, informatika [From multi-agent systems to intelligent organisations: philosophy, psychology, computer science].— Moscow: Editorial URSS Publ., 2002.— 352 p. (In Russ.)
10. Belov A. V. Povyshenie effektivnosti ispolzovaniya ulichno-dorozhnykh setej na osnove upravleniya formirovaniem transportnykh potokov: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.22.01 [Improving the efficiency of road network utilisation based on traffic flow formation management: Candidate of Technical Sciences dissertation].— Moscow, 2014.— 134 p. (In Russ.)
11. Belov A. V., Butenko Yu. V. Analiz vozmozhnosti i perspektiv dostizheniya sistemno-optimalnogo raspredeleniya transportnykh potokov s poyavleniem podklyuchennykh i vysokoavtomatizirovannykh transportnykh sredstv [Analysis of the feasibility and prospects of achieving system-optimal traffic distribution with the advent of connected and highly automated vehicles] // *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin [World of Transport and Technological Machines]*.— 2025.— No. 1–3 (88).— P. 120–129.— DOI: 10.33979/2073-7432-2025-1-3(88)-120-129. (In Russ.)
12. Eugster P. Th., Felber P. A., Guerraoui R., Kermarrec A.—M. The many faces of publish/subscribe // *ACM Computing Surveys*.— 2003.— Vol. 35.— No. 2.— P. 114–131.
13. Jerome Z., Ren Y., Liu H. et al. Traffic light optimization with low penetration rate vehicle trajectory data // *Nature Communications*.— 2024.— Vol. 15.— Art. 1306.
14. Cetin M. et al. *Active bottleneck management on freeways through connected vehicle technology*.— NTC, University of Maryland, 2018.
15. Roughgarden T., Tardos E. How bad is selfish routing? // *Journal of the ACM*.— 2002.— Vol. 49.— No. 2.— P. 236–259.
16. Small K. The Bottleneck Model: An Assessment and Interpretation // *Economics of Transportation*.— 2015.— Vol. 4.— No. 1–2.— P. 110–117.
17. Wardrop J. G. Some theoretical aspects of road traffic research // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*.— 1952.— Vol. 1.— P. 325–378.
18. Usman M. et al. Taxonomies in software engineering: A systematic mapping study and a revised taxonomy development method // *Information and Software Technology*.— 2017.— Vol. 85.— P. 43–59.
19. Gomez A. E. et al. Cooperative Intelligent Transport Systems: The Impact of C-V2X Communication Technologies // *Electronics*.— 2025.— Vol. 14.— No. 7.— Art. 1279.
20. PNST 633–2022. *Intellektualnye transportnye sistemy. Kooperativnye adaptivnye sistemy krujz-kontrolya. Trebovaniya k ekspluatatsionnym kharakteristikam i metody ispytaniya [Intelligent transport systems. Cooperative adaptive cruise control systems. Performance requirements and test methods]*.— Moscow: Standartinform Publ., 2022. (In Russ.)
21. Shvetsov A. N. *Raspredelennye intellektualnye informatsionnye sistemy [Distributed intelligent information systems]*.— Saint Petersburg: SPbGETU LETI Publ., 2017.— 180 p. (In Russ.)

Сведения об авторе	Information about the author
Белов Александр Владимирович кандидат технических наук, руководитель проектов Инновационного центра «Безопасный транспорт» ГУП «Московский метрополитен», приглашенный преподаватель ФГАОУ ВО Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» SPIN-код: 1704–1913 ORCID: 0000–0002–6132–4987 Адрес: ГУП «Московский метрополитен» 129110, г. Москва, пр. Мира, д. 41 стр. 2 E-mail: belov_trans@mail.ru	Belov Alexander Vladimirovich Candidate of Technical Sciences, Project Manager at the Innovation Center “Safe Transport”, SUE Moscow Metro; Visiting Lecturer at HSE University (MIEM) SUE Moscow Metro SPIN code: 1704–1913 ORCID: 0000–0002–6132–4987 Address: SUE “Moscow Metro”, 41/2 Mira Avenue, Moscow, 129110, Russia E-mail: belov_trans@mail.ru

Статья получена 25.02.2026 | статья опубликована 25.03.2026

Article received 25.02.2026 | Article published 25.03.2026

УДК 656.02:005.92

ВНЕДРЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ПУТЕВОГО ЛИСТА В ГУП «МОСГОРТРАНС»: ОПЫТ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА МЕГАПОЛИСА

Н. А. Асаул

Д. А. Полунин

ГУП «Мосгортранс»

Аннотация. В статье рассматривается процесс внедрения электронного путевого листа (ЭПЛ) в ГУП «Мосгортранс» — крупнейшем перевозчике наземного пассажирского транспорта в городе Москве. На основе анализа опыта предприятия, научных публикаций и открытых данных исследуются предпосылки, этапы реализации, технические решения и результаты цифровой трансформации документооборота в части ЭПЛ. Особое внимание уделяется проблемам, возникшим в ходе внедрения, и способам их преодоления. Авторами обобщены количественные и качественные эффекты от перехода на использование ЭПЛ, включая экономию ресурсов, сокращение временных затрат персонала и повышение прозрачности перевозочного процесса. Статья вносит вклад в изучение практик цифровизации городского пассажирского транспорта и может быть полезна специалистам транспортной отрасли, исследователям цифровой экономики и руководителям предприятий, планирующих внедрение электронного документооборота.

Ключевые слова: электронный путевой лист, цифровизация транспорта, пассажирские перевозки, ГУП «Мосгортранс», электронный документооборот, государственная информационная система электронных перевозочных документов (ГИС ЭПД), автобусы, городской транспорт.

UDC 656.02:005.92

IMPLEMENTATION OF THE ELECTRONIC WAYBILL AT SUE «MOSGORTRANS»: THE EXPERIENCE OF DIGITAL TRANSFORMATION IN METROPOLITAN PASSENGER TRANSPORT

N.A. Asaul

D.A. Polunin

State Unitary Enterprise «Mosgortrans»

Abstract. This article examines the implementation of the electronic waybill (EWB) at SUE «Mosgortrans», the largest operator of surface passenger transport in Moscow. Drawing on an analysis of the enterprise's experience, academic publications, and open-source data, the article investigates the prerequisites, implementation stages, technical solutions, and outcomes of the digital transformation of document management as it relates to the EWB. Particular attention is given to the challenges encountered during implementation and the approaches adopted to address them. The authors summarise the quantitative and qualitative effects of the transition to the EWB, including resource savings, reductions in staff time expenditure, and improvements in the transparency of transport operations. The article contributes to the study of digitalisation practices in urban passenger transport and may be of value to transport sector professionals, researchers in the digital economy, and enterprise managers planning the introduction of electronic document management.

Keywords: electronic waybill, transport digitalisation, passenger transport, SUE «Mosgortrans», electronic document management, state information system of electronic transport documents (GIS EPD), buses, urban transport.

Введение

Недостаточный уровень цифровизации и внедрения новых технологий на транспорте ограничивает долгосрочное инновационное развитие транспортного комплекса, что обусловило постановку Транспортной стратегией РФ до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363–р, задачи цифровизации перевозок, в том числе пассажирских.

В условиях растущих требований к безопасности перевозок, прозрачности учетных процессов и эффективности использования ресурсов особое значение приобретает внедрение электронного документооборота на предприятиях пассажирского транспорта.

Согласно Федеральному закону от 8 ноября 2007 г. № 259–ФЗ «Устав автомобильного транспорта и городского наземного электрического транспорта» (далее — Устав АТ и ГНЭТ) путевой лист — документ, служащий для учета и контроля работы транспортного средства и водителя. Кроме того, в большинстве случаев учетной политикой предприятия путевой лист устанавливается как основной первичный документ. На протяжении десятилетий путевой лист существовал исключительно в бумажной форме, что порождало значительные издержки: временные затраты на оформление, расходы на печать и хранение, риски ошибок при заполнении и сложности с оперативным контролем.

Методы

Теоретико-методологическую основу настоящего исследования составили труды российских ученых в области цифровизации транспорта и электронного документооборота [4]. Значительный вклад в разработку проблематики внедрения информационных технологий на транспорте внесли Курганов В. М., Дорофеев А. Н., Грязнов М. В. [5], исследовавшие функционал путевого листа в цифровых системах управления автотранспортными предприятиями.

Прикладные аспекты автоматизации учета

Результаты и обсуждение

Путевой лист в автомобильном транспорте является документом первичного учета, выполняющим комплекс функций:

ГУП «Мосгортранс» — крупнейший оператор наземного городского пассажирского транспорта в России, который обслуживает около 750 маршрутов регулярных перевозок города Москвы и Московской области и ежедневно перевозит около 3,5 миллиона пассажиров. Масштаб деятельности предприятия обуславливает колоссальные объемы документооборота: до начала внедрения электронного путевого листа (ЭПЛ) ежедневно формировалось около 7,5 тысячи бумажных путевых листов, что требовало более тонны бумаги ежемесячно, а архивный фонд за пять лет хранения достигал объема четырех 20-футовых контейнеров. Оформление каждого бумажного путевого листа занимало до 30 минут и требовало проставления 14 обязательных отметок, что создавало очереди водителей на выпуске на линию и увеличивало время подготовки водителей к работе на маршруте.

Актуальность настоящего исследования вызвана необходимостью систематизации и осмысления первого масштабного опыта внедрения электронных путевых листов на предприятии пассажирского транспорта федерального значения.

Целью статьи является анализ процесса, результатов и проблем внедрения ЭПЛ в ГУП «Мосгортранс» на основе первичных материалов предприятия, дополненных данными из научных публикаций и открытых источников.

Путевых листов на пассажирском транспорте рассматривались в публикациях коллектива авторов под руководством Брусникиной А. Б. [6]. Авторы изучили результаты исследований зарубежных ученых в сфере цифровизации транспорта и документооборота [7–9].

В процессе подготовки применялись методы системного анализа, сравнения и обобщения, а также метод анализа кейсов (case study), позволяющий детально изучить уникальный опыт конкретного предприятия.

- учетных: фиксация пробега, расхода топлива, режима труда и отдыха водителя;
- контрольных: подтверждение прохождения

предрейсового медицинского осмотра и контроля технического состояния транспортного средства;

- разрешительных: допуск водителя и транспортного средства к осуществлению перевозок.

В системе управления автотранспортным предприятием путевой лист выступает связующим звеном между различными информационными потоками: данными о водителях, транспортных средствах, маршрутах движения, выполненных рейсах и фактических показателях транспортной работы.

Исследователи [5] отмечают, что в цифровой модели эффективного автотранспортного предприятия путевой лист занимает центральное место, интегрируя информацию из различных подсистем и обеспечивая формирование полной картины производственных процессов. Применение концепции цифровых двойников и методов Process Mining позволяет не только автоматизировать учет, но и выявлять узкие места в организации перевозок, оптимизировать трудозатраты персонала и повышать достоверность учетных данных.

Формирование нормативной базы для внедрения электронных перевозочных документов в Российской Федерации прошло несколько этапов.

В первую очередь 2 июля 2021 года были внесены изменения в Устав АТ и ГНЭТ. Они закрепили понятие государственной информационной системы электронных перевозочных документов (ГИС ЭПД) как федеральной государственной информационной системы, обеспечивающей получение от операторов электронных перевозочных документов (в том числе ЭПЛ) и содержащихся в них сведений, их обработку и хранение. Также были определены понятия ЭПЛ и других электронных перевозочных документов, а также полномочия органов власти по организации, обеспечению функционирования и доступу к ГИС ЭПД.

Ключевым событием стало вступление в силу с 1 сентября 2022 года Правил обмена электронными перевозочными документами, утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации от 21 мая 2022 года № 931. Данный нормативный правовой акт установил порядок взаимодействия участников перевозочного процесса при обмене электронными документами и определил требования к операторам электронного документооборота.

Первоначально перечень документов, которые могли оформляться в электронном виде, включал транспортную накладную, заказ-наряд и сопроводительную ведомость. С 1 марта 2023 года этот перечень был существенно расширен

за счет включения ЭПЛ, электронного заказа (заявки), электронного договора фрахтования и экспедиторской расписки. Важно подчеркнуть, что на начальном этапе внедрение электронных перевозочных документов носило добровольный характер, однако ожидается постепенный переход к обязательному применению для всех участников транспортного рынка.

Центральным элементом инфраструктуры электронного документооборота в транспортной отрасли является ГИС ЭПД, обеспечивающая обмен сведениями из электронных перевозочных документов между участниками перевозочного процесса и предоставление таких сведений уполномоченным органам власти.

Архитектура ГИС ЭПД построена по принципу взаимодействия нескольких категорий участников: перевозчиков, заказчиков перевозок, водителей, контролирующих органов и операторов электронных перевозочных документов.

Операторы электронных перевозочных документов выполняют функцию посредников, обеспечивающих техническую возможность формирования, подписания и передачи электронных документов в ГИС ЭПД.

Важной особенностью функционирования системы является возможность отслеживания статуса перевозки в режиме реального времени, что существенно повышает прозрачность транспортных процессов.

Решение о переходе на ЭПЛ в ГУП «Мосгортранс» было обусловлено комплексом факторов, среди которых ключевое значение имели масштабы документооборота предприятия и связанные с ними издержки. Анализ исходной ситуации, проведенный проектной командой, выявил следующие проблемные точки:

1. ежедневное формирование около 7,5 тысячи бумажных путевых листов требовало значительных трудозатрат диспетчерского, медицинского и технического персонала;
2. ежемесячный расход бумаги превышал одну тонну, что в годовом исчислении составляло существенную статью затрат и противоречило экологическим приоритетам развития города Москвы;
3. архив путевых листов за пятилетний период хранения достигал объема четырех 20-футовых контейнеров, создавая проблемы с размещением и доступом к ретроспективной информации;
4. оформление одного бумажного путевого листа требовало проставления 14 отметок различными специалистами и занимало

- до 30 минут, что приводило к образованию очередей на выпуске и увеличению времени подготовки водителей к выходу на маршрут;
5. высокая вероятность ошибок при ручном заполнении создавала риски штрафных санкций со стороны контролирующих органов и искажения учетных данных.

Инициация проекта по внедрению электронного путевого листа состоялась в 2023 году, когда предприятие приступило к пилотному тестированию цифрового формата документа.

Параллельно с этим велась работа по нормативно-правовому обеспечению проекта: утверждение плана-графика внедрения, проведение аудита существующих процессов, разработка целевой схемы формирования ЭПЛ, подготовка локальных нормативных актов.

Для реализации проекта была сформирована специализированная проектная команда под руководством начальника отдела цифровизации производственных процессов. В состав команды вошли руководитель проекта и сотрудники различных подразделений, что обеспечило комплексный подход к решению задач и учет интересов всех участников процесса.

Мероприятия по проекту были разделены на два крупных блока:

I. Операционные задачи:

- обучение сотрудников работе с электронными путевыми листами;
- подача заявок в техническую поддержку;
- направление запросов на замену и усиление автоматизированных рабочих мест пользователей;
- подготовка и направление отчетов о выпуске водителей по ЭПЛ;
- прием и передача заявлений на выпуск электронных подписей в удостоверяющий центр.

II. Задачи развития и целевой разработки:

- доработка учетной системы ГУП «Мосгортранс» и мобильного приложения «Идеальный автопарк» для интеграции с ЭПЛ;
- подготовка технических заданий на доработку систем операторов;
- контроль реализации и тестирование доработок;
- установка оборудования и обучение сотрудников.

Ключевым партнером ГУП «Мосгортранс» в реализации проекта выступили три оператора, внесенные в реестр операторов электронных перевозочных документов, администрируемый Минтрансом России.

Техническая архитектура решения включала несколько взаимосвязанных компонентов:

1. мобильное приложение «Идеальный автопарк» для сотрудников ГУП «Мосгортранс», в котором для водителей формировался QR-код, содержащий информацию о сроке действия путевого листа, транспортном средстве и водителе, данных об оформившем документ лице, виде перевозки и техническом состоянии автобуса;
2. автоматизированные рабочие места специалистов (инспекторов предрейсового и после рейсового осмотров, медицинских работников, механиков, диспетчеров), интегрированные с учетной системой предприятия и обеспечивающие внесение и подписание необходимых сведений;
3. интеграционный слой, обеспечивающий взаимодействие информационных систем ГУП «Мосгортранс» с платформами операторов электронных перевозочных документов и последующую передачу данных в ГИС ЭПД.

Особенностью проекта стала его высокая сложность в технической реализации, обусловленная необходимостью кастомизации сервиса под специфические бизнес-процессы ГУП «Мосгортранс». Как отмечают участники внедрения, совмещение ИТ-архитектуры операторов электронных перевозочных документов и ГУП «Мосгортранс» потребовало значительных временных затрат и непрерывных улучшений продукта «с колес».

Поэтапное масштабирование проекта осуществлялось в течение 2023–2024 годов:

- март 2023 г. — официальное начало проекта внедрения ЭПЛ;
- апрель 2023 г. — сформирован первый ЭПЛ в Российской Федерации, по которому автобус выехал на линию;
- ноябрь 2023 г. — принято решение о масштабировании проекта на весь ГУП «Мосгортранс»;
- февраль 2024 г. — полный перевод эксплуатационной площадки (парка) «Очаково» (более 260 автобусов почти на 40 маршрутах);
- август 2024 г. — перевод половины эксплуатационных площадок ГУП «Мосгортранс» на выпуск на линию по ЭПЛ;
- октябрь 2024 г. — полный перевод всех эксплуатационных площадок ГУП «Мосгортранс» на выпуск на линию по ЭПЛ;
- ноябрь 2024 г. — полный перевод всех неэксплуатационных площадок ГУП «Мосгортранс» на выпуск по ЭПЛ.

По состоянию на февраль 2026 года по ЭПЛ выезжают на линию более 7 тысяч автобусов

и электробусов, работающих на около 750 регулярных маршрутах. С июля 2023 года выпущено более 5 миллионов ЭПЛ, ежедневно более 6 тысяч водителей выезжают на линию по ЭПЛ.

Внедрение ЭПЛ в ГУП «Мосгортранс» позволило достичь значимых количественных и качественных результатов, которые могут быть систематизированы по нескольким направлениям.

Экономические эффекты:

1. экономия на печати путевых листов — более 6,5 млн руб. в год за счет отказа от расходных материалов и обслуживания печатной техники;
2. экономия за счет снижения нагрузки на сотрудников — более 30 млн руб. в год, что эквивалентно высвобождению значительного объема рабочего времени персонала;
3. сокращение расходов на хранение архивов — ликвидация затрат на содержание физического архива объемом четыре 20-футовых контейнера;
4. экологический эффект — сохранение до 1,5 т бумаги ежемесячно, что за пять лет использования цифровых документов позволит сохранить около 2,5 га деревьев.

Эффекты производительности и временных затрат:

1. экономия времени водителя на оформлении путевого листа — до 26 мин за смену, что в годовом исчислении составляет около 2,5 дня высвобожденного времени. Ранее на оформление бумажных путевых листов водители тратили около 5 дней в год;
2. ускорение выхода на маршрут — возможность начинать движение на 13 мин раньше благодаря сокращению времени оформления документов;
3. автоматизация заполнения — исключение ручного ввода данных и связанных с ним ошибок, что повышает достоверность учетной информации;
4. повышение точности соблюдения расписания — за счет сокращения времени предрейсовой подготовки.

Эффекты контроля и безопасности:

1. прозрачность процесса выпуска транспортных средств на линию — все этапы оформления фиксируются в электронной системе с указанием ответственных лиц и времени совершения операций;

2. интеграция с электронными журналами технического контроля транспортных средств и регистрации результатов медицинских осмотров водителей;
3. автоматизация получения показаний одометра с бортового компьютера транспортного средства, исключающая возможность искажения данных о пробеге;
4. подписание сведений с использованием УНЭП «Госключ» на планшетах, обеспечивающее юридическую значимость электронных документов;
5. возможность проверки ЭПЛ с помощью QR-кода уполномоченными контрольно-надзорными органами (МВД России, Ространснадзор).

Процесс перехода на ЭПЛ не был лишен проблем, которые потребовали оперативного реагирования и поиска нестандартных решений. Анализ позволяет выделить следующие группы проблем и соответствующие способы их решения.

Организационно-мотивационные проблемы:

1. нежелание водителей использовать личные мобильные телефоны (смартфоны) для работы с ЭПЛ. Решением стало установление с 1 мая 2024 г. компенсации водителям расходов на мобильную связь, связанных с использованием личного мобильного телефона (смартфона) и личной SIM-карты в служебных целях в рабочее время в рамках исполнения должностных обязанностей, что нивелировало проблему использования личных мобильных телефонов (смартфонов) не только для работы с ЭПЛ, но и в иных служебных целях;
2. сопротивление изменениям со стороны сотрудников, привыкших к традиционным формам работы. Переход на ЭПЛ потребовал обширной разъяснительной работы с пояснением преимуществ использования ЭПЛ для сотрудников.

Технические и технологические проблемы:

1. невозможность изменения сведений о водителях в ЭПЛ (одновременная работа на линии водителя-стажера и водителя-наставника). Данная проблема будет решена путем внесения изменений в Правила информационного обмена электронными перевозочными документами, утвержденные постановлением Правительства Российской Федерации от 21 мая 2022 г. № 931;

2. отсутствие возможности выезда по ЭПЛ у водителей с иностранными правами из-за отличий водительских удостоверений. Для решения проблемы проведены доработки систем для автоматической выгрузки всех водителей в систему ЭПЛ;
3. сложность кастомизации сервиса под требования ГУП «Мосгортранс» и совмещения ИТ-архитектуры операторов электронных перевозочных документов и предприятия;
4. необходимость непрерывных улучшений информационных систем операторов электронных перевозочных документов параллельно с процессом внедрения ЭПЛ.

Опыт ГУП «Мосгортранс» по внедрению электронных путевых листов представляет значительный интерес для практического применения на других предприятиях пассажирского транспорта. Проведенный анализ позволяет сделать ряд обобщений и выявить перспективные направления дальнейшего развития.

Внедрение электронных путевых листов на пассажирском транспорте является общемировым трендом, однако степень распространенности и подходы к реализации существенно различаются по странам. Например, в Польше мобильный электронный путевой лист в течение нескольких лет успешно применяется на железнодорожном транспорте, однако на наземном городском пассажирском транспорте, за исключением нескольких операторов, отказ от бумажных путевых листов до последнего времени не был реализован.

Особенностью российской модели является создание единой государственной информационной системы (ГИС ЭПД), обеспечивающей централизованный сбор и хранение электронных перевозочных документов с возможностью доступа к ним контрольно-надзорных органов. Такой подход, с одной стороны, повышает прозрачность отрасли и упрощает процедуры проверок, с другой — требует от предприятий дополнительных усилий по интеграции своих информационных систем с государственной платформой.

Опыт ГУП «Мосгортранс» подтверждает теоретические положения, сформулированные в работах Курганова В. М. с соавторами [5], о центральной роли путевого листа в цифровой модели автотранспортного предприятия. Внедрение ЭПЛ позволило не просто перевести в электронную форму существовавший бумажный документ, но и существенно трансформировать связанные бизнес-процессы, интегрировав

данные из различных источников: систем телемедицины, технического диагностирования, бортовых компьютеров транспортных средств, диспетчерских систем.

Реализованная в ГУП «Мосгортранс» модель может рассматриваться как практическая реализация концепции цифрового двойника процессов выпуска транспортных средств на линию, где электронный путевой лист выступает не просто учетной формой, а инструментом управления и контроля, обеспечивающим формирование достоверной цифровой трассировки всех операций.

Дальнейшее развитие системы электронных перевозочных документов в ГУП «Мосгортранс» видится по нескольким направлениям:

1. расширение функциональности мобильного приложения «Идеальный автопарк» для водителей, включая интеграцию с навигационными системами, системами информирования пассажиров, сервисами контроля режима труда и отдыха;
2. развитие интеграции с электронными сервисами контрольно-надзорных органов, включая использование технологии «Госуслуги авто» для предоставления иных документов, которые пока требуются в бумажном виде;
3. применение методов Process Mining для анализа накопленных данных о процессах выпуска и движения транспортных средств с целью выявления узких мест и дальнейшей оптимизации;
4. внедрение других видов электронных перевозочных документов: электронного договора фрахтования и электронного заказ-наряда.

Важным уроком проекта внедрения ЭПЛ в ГУП «Мосгортранс» является необходимость тщательного учета человеческого фактора при внедрении цифровых технологий. Проблема нежелания водителей использовать личные мобильные устройства была решена не административными методами, а путем введения системы компенсаций, что позволило сохранить мотивацию персонала и избежать конфликтов.

Опыт преодоления сопротивления изменениям в ГУП «Мосгортранс» подтверждает выводы исследователей о том, что успех цифровой трансформации в равной степени зависит как от качества технических решений, так и от готовности персонала к работе в новых условиях и наличия эффективных механизмов мотивации.

Заключение

Внедрение электронного путевого листа в ГУП «Мосгортранс» представляет собой масштабный и успешный проект цифровой трансформации документооборота на крупнейшем предприятии пассажирского транспорта России. Анализ результатов проекта позволяет сформулировать следующие основные выводы:

1. предпосылки внедрения ЭПЛ в ГУП «Мосгортранс» были обусловлены масштабами деятельности предприятия и связанными с ними издержками бумажного документооборота: ежедневным формированием тысяч путевых листов, значительными расходами на печать и хранение, высокими временными затратами персонала на оформление документов;
2. организация проектного управления включала формирование специализированной команды, поэтапное планирование, аудит существующих процессов, разработку целевой схемы и активное взаимодействие с партнерами — операторами электронных перевозочных документов;
3. техническая реализация проекта потребовала значительных усилий по кастомизации решения под специфику предприятия, интеграции учетных систем с платформой операторов электронных перевозочных документов и обеспечения непрерывности производственных процессов в период перехода;
4. достигнутые результаты включают экономию более 6,5 миллиона рублей в год на печати путевых листов и свыше 30 миллионов рублей за счет снижения нагрузки на сотрудников, сокращение времени оформления документов до 26 минут на одного водителя, повышение прозрачности и контролируемости процессов, экологический эффект от экономии бумаги;
5. проблемы внедрения были связаны с челове-

ческим фактором (нежелание использовать личные устройства, сопротивление изменениям), техническими ограничениями (невозможность изменения сведений о водителе в ЭПЛ, сложности с иностранными правами) и необходимыми изменениями нормативной базы. Выработанные способы решения проблем могут быть полезны для других предприятий, планирующих аналогичные проекты;

6. перспективы развития включают расширение функциональности мобильного приложения «Идеальный автопарк», углубление интеграции с государственными информационными системами, применение методов анализа данных для оптимизации процессов и тиражирование опыта на другие транспортные предприятия.

Опыт ГУП «Мосгортранс» подтверждает, что ЭПЛ является не просто цифровым аналогом бумажного документа, а драйвером комплексной цифровизации производственных процессов, обеспечивающим синергетический эффект от интеграции различных информационных систем, и создания единой цифровой среды управления пассажирскими перевозками. Успешная реализация проекта создает основу для дальнейшего развития цифровых сервисов и повышения качества транспортного обслуживания населения.

Дальнейшие исследования в данной области могут быть направлены на сравнительный анализ опыта внедрения электронных перевозочных документов на различных предприятиях, разработку методик оценки эффективности цифровой трансформации транспорта, а также изучение влияния электронного документооборота на безопасность и качество пассажирских перевозок.

Список литературы

1. Федеральный закон от 08.11.2007 № 259-ФЗ «Устав автомобильного транспорта и городского наземного электрического транспорта».
2. Постановление Правительства Российской Федерации от 21.05.2022 № 931 «Об утверждении Правил обмена электронными перевозочными документами и сведениями, содержащимися в них, между участниками информационного взаимодействия, направления таких документов и сведений в государственную информационную систему электронных перевозочных документов, а также представления иной информации, связан-

ной с обработкой таких документов и сведений, из информационной системы электронных перевозочных документов в государственную информационную систему электронных перевозочных документов по запросу оператора государственной информационной системы электронных перевозочных документов».

3. Приказ Минтранса России от 28.09.2022 № 390 «Об утверждении состава сведений, указанных в части 3 статьи 6 Федерального закона от 08.11.2007 № 259-ФЗ «Устав автомобильного транспорта и городского наземного электриче-

ского транспорта», и порядка оформления или формирования путевого листа» (зарегистрировано в Минюсте России 29.11.2022, регистрационный № 71192).

4. Кобозева Н. Г. Развитие транспортных систем в условиях внедрения цифровой государственной информационной системы «Электронные перевозочные документы» // Экономика, предпринимательство и право. — 2023. — Т. 13. — № 12. — С. 6009–6018. — DOI: 10.18334/epp.13.12.120494.

5. Курганов В. М., Дорофеев А. Н., Грязнов М. В. Функционал путевого листа в Transportation Management System // Вестник СибаДИ. — 2022. — Т. 19. — № 2 (84). — С. 216–223. — DOI: 10.26518/2071–7296–2022–19–2–216–223.

6. Брусникина А. Б., Дружинина Н. Г., Трофимова О. Г. Единая информационная система ведения электронных путевок на предприятиях

пассажирского транспорта // Editorum. — 2022. — С. 69–76.

7. Subramanya K., Kermanshachi S., Pamidimukkala A. Evaluation of E-Ticketing Technology in Construction of Highway Projects: A Systematic Review of Adoption Levels, Benefits, Limitations and Strategies // Frontiers in Built Environment. — 2022. — Vol. 8. — Article 890024. — DOI: 10.3389/fbuil.2022.890024.

8. Elovego D. V. Performance indicators of implemented digital solutions as a new quality assessment approach to passenger transportation by urban land electric transport // Транспортные системы. — 2025. — Т. 11. — № 3. — С. 384–395. — DOI: 10.17816/transsyst690106.

9. Mobile Digital Waybill in Organization and Management of City Public Transport // Proceedings of the 45th IBIMA Conference. — Cordoba, Spain, 2025.

References

1. Federalnyj zakon ot 08.11.2007 No. 259–FZ «Ustav avtomobilnogo transporta i gorodskogo nazemnogo elektricheskogo transporta» [Federal Law dated 08.11.2007 No. 259–FZ “Charter of Road Transport and Urban Ground Electric Transport”]. — (In Russ.)

2. Postanovlenie Pravitelstva Rossijskoj Federatsii ot 21.05.2022 No. 931 «Ob utverzhdenii Pravil obmena elektronnyimi perevozochnymi dokumentami...» [Decree of the Government of the Russian Federation dated 21.05.2022 No. 931 “On Approval of the Rules for the Exchange of Electronic Transport Documents...”]. — (In Russ.)

3. Prikaz Mintransa Rossii ot 28.09.2022 No. 390 «Ob utverzhdenii sostava svedenij, ukazannykh v chasti 3 stat’i 6 Federal’nogo zakona ot 08.11.2007 No. 259–FZ...» [Order of the Ministry of Transport of Russia dated 28.09.2022 No. 390 “On Approval of the Composition of Information Specified in Part 3 of Article 6 of Federal Law No. 259–FZ dated 08.11.2007...”]. — Registered with the Ministry of Justice of Russia 29.11.2022, reg. No. 71192. — (In Russ.)

4. Kobozeva N. G. Razvitie transportnykh sistem v usloviyakh vnedreniya tsifrovoj gosudarstvennoj informatsionnoj sistemy «Elektronnye perevozochnye dokumenty» [Development of transport systems in the context of implementing the digital state information system “Electronic Transport Documents”] // Ekonomika, predprinimatelstvo i pravo [Economics, Entrepreneurship and Law]. — 2023. — Vol.

13. — No. 12. — P. 6009–6018. — DOI: 10.18334/epp.13.12.120494. (In Russ.)

5. Kurganov V. M., Dorofeev A. N., Gryaznov M. V. Funktsional putevogo lista v Transportation Management System [The waybill functionality in a Transportation Management System] // Vestnik SibADI [Bulletin of SibADI]. — 2022. — Vol. 19. — No. 2 (84). — P. 216–223. — DOI: 10.26518/2071–7296–2022–19–2–216–223. (In Russ.)

6. Brusnikina A. B., Druzhinina N. G., Trofimova O. G. Edinaya informatsionnaya sistema vedeniya elektronnykh putevok na predpriyatiyakh passazhirskogo transporta [A unified information system for managing electronic waybills at passenger transport enterprises] // Editorum. — 2022. — P. 69–76. (In Russ.)

7. Subramanya K., Kermanshachi S., Pamidimukkala A. Evaluation of e-ticketing technology in construction of highway projects: a systematic review of adoption levels, benefits, limitations and strategies // Frontiers in Built Environment. — 2022. — Vol. 8. — Art. 890024. — DOI: 10.3389/fbuil.2022.890024.

8. Elovego D. V. Performance indicators of implemented digital solutions as a new quality assessment approach to passenger transportation by urban land electric transport // Transportnye sistemy [Transport Systems]. — 2025. — Vol. 11. — No. 3. — P. 384–395. — DOI: 10.17816/transsyst690106.

9. Mobile Digital Waybill in Organization and Management of City Public Transport // Proceedings of the 45th IBIMA Conference. — Cordoba, Spain, 2025.

Сведения об авторах	Information about the authors
Асаул Николай Анатольевич доктор экономических наук, профессор, генеральный директор ГУП «Мосгортранс», заведующий кафедрой автомобильных перевозок Московского автомобильно- дорожного государственного технического университета (МАДИ), ГУП «Мосгортранс» Адрес: ГУП «Мосгортранс», 125195, Россия, г. Москва, Ленинградское шоссе, д. 59 ORCID: 0009-0002-2470-8436 E-mail: pr.asaula@transport.mos.ru	Asaul Nikolai Anatolyevich Doctor of Economic Sciences, Professor; Director General, SUE «Mosgortrans» Head of the Department of Road Transport, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) Address: SUE «Mosgortrans», 59 Leningradskoe Shosse, Moscow, 125195, Russia ORCID: 0009-0002-2470-8436 E-mail: pr.asaula@transport.mos.ru
Полунин Дмитрий Александрович заместитель начальника службы трансформации ГУП «Мосгортранс» Адрес: ГУП «Мосгортранс», 125195, Россия, г. Москва, Ленинградское шоссе, д. 59 ORCID: 0009-0000-1567-5156 E-mail: PoluninDA2@transport.mos.ru	Polunin Dmitry Alexandrovich Deputy Head of the Transformation Service, SUE «Mosgortrans» Address: SUE «Mosgortrans», 59 Leningradskoe Shosse, Moscow, 125195, Russia ORCID: 0009-0000-1567-5156 E-mail: PoluninDA2@transport.mos.ru

Статья получена 24.02.2026 | статья опубликована 25.03.2026

Article received 24.02.2026 | Article published 25.03.2026

УДК 378.147

КАДРЫ ДЛЯ ТРАНСПОРТА БУДУЩЕГО: ИССЛЕДОВАНИЕ БАРЬЕРОВ ИНЖЕНЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

О. О. Гринева*ФГБОУ ВО Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова***Д. С. Вьюнова***ГАОУ ВО «Московский городской педагогический университет»***М. В. Кларин***ГАОУ ВО «Московский городской педагогический университет»***И. В. Лопатинская***ФГБОУ ВО Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова*

Аннотация. Статья посвящена исследованию системных барьеров формирования инженерного мышления в контексте кадрового дефицита транспортной отрасли России. На основе пилотного качественного исследования — 24 глубинных интервью с преподавателями инженерных программ, практикующими инженерами и представителями индустрии, — выявлены четыре устойчивых барьера подготовки инженерных кадров: хроническое отставание учебных программ от технологического развития, слабая связь обучения с реальным производством, утрата института наставничества и дефицит коммуникативных компетенций. На основе анализа 1 176 кодированных цитат предложены практические рекомендации для транспортных вузов и отраслевых предприятий: переход к проблемно-ориентированному обучению как стандарту массовой инженерной подготовки, институционализация наставничества, выстраивание устойчивого партнерства с индустрией и разработка новых метрик оценки качества подготовки выпускников.

Ключевые слова: инженерное образование, транспортная отрасль, кадровый дефицит, барьеры профессиональной подготовки, инженерное мышление, наставничество, проблемно-ориентированное обучение, глубинные интервью, качественные исследования, передовые инженерные школы.

UDC 378.147

PERSONNEL FOR THE TRANSPORT OF THE FUTURE: A STUDY OF BARRIERS IN ENGINEERING EDUCATION

O. O. Grineva*Plekhanov Russian University of Economics***D. S. Vyunova***Centre for Didactics of Professional Education, MCU***M. V. Klarin***Centre for Didactics of Professional Education, MCU***I. V. Lopatinskaya***Plekhanov Russian University of Economics*

Abstract. This article examines the systemic barriers to the development of engineering thinking in the context of the personnel shortage in Russia's transport sector. Four persistent barriers to engineering workforce training emerged from a pilot qualitative study comprising 24 in-depth interviews with engineering program lecturers, practicing engineers, and industry representatives: the chronic lag of curricula behind technological development, the weak link between education and real-world production, the erosion of the mentorship institution, and a deficit of communication competencies. Based on the analysis of 1,176 coded citations, practical recommendations are proposed for transport universities and industry enterprises: a transition to problem-based learning as the standard for mass engineering training, the institutionalization of mentorship, the building of sustainable industry partnerships, and the development of new metrics for assessing graduate quality.

Keywords: engineering education, transport sector, personnel shortage, barriers to professional training, engineering thinking, mentorship, problem-based learning, in-depth interviews, qualitative research, advanced engineering schools.

Введение

Российская транспортная инфраструктура переживает период, который без преувеличения можно назвать переломным. Высокоскоростные железнодорожные магистрали, беспилотный городской транспорт, цифровые системы управления движением — все это уже не планы на отдаленное будущее, а проекты с конкретными сроками и финансированием. Только программа развития высокоскоростных магистралей (ВСМ) предполагает создание магистралей общей протяженностью более 4 000 км к 2045 году [1]. Масштаб инфраструктурных преобразований таков, что кадровый вопрос стал одним из ключевых рисков для всей отрасли [5, 10].

По оценке аналитиков компании Arthur Consulting, транспортная отрасль испытывает дефицит специалистов в диапазоне 15–20%. Речь идет не о численности, а о качестве подготовки: нынешние программы не успевают за темпами технологического обновления и не формируют у выпускников способности быстро адаптироваться к новым задачам [9, 12].

Развитие транспортной инфраструктуры опережает трансформацию системы подготовки кадров: специалисты, обеспечивающие ее проек-

тирование, эксплуатацию и совершенствование, во многом формируются в рамках образовательной модели, сложившейся в иных технологических и институциональных условиях [8].

Данная статья основана на результатах пилотного исследования, проведенного в рамках проекта «Дидактика развития инженерного мышления» Центра дидактики профессионального образования Московского городского педагогического университета (МГПУ). Мы исходили из предположения, что реальные барьеры в подготовке инженеров не фиксируются опросами и рейтингами. Их можно увидеть только через личные истории преподавателей, которые работают в системе, инженеров, которые прошли через нее, и работодателей. Этим объясняется тот факт, что в основу исследования легли глубинные интервью, а не анкеты [14].

Барьеры, которые мы описываем, не уникальны для транспортной отрасли. Но именно здесь, где цена ошибки измеряется безопасностью пассажиров, они ощущаются острее всего. Таким образом, можем констатировать, что транспортная сфера является одним из наиболее перспективных полигонов для изменений [9].

Методы

Исследование строилось на методологии качественных маркетинговых исследований [2]. Глубинные интервью в данном контексте рассматривались нами не просто как альтернатива анкетам. Они позволяют зафиксировать мотивы, скрытые барьеры, эмоциональные триггеры, переломные моменты в профессиональном пути, другими словами, то, что стандартизированные шкалы принципиально упускают [13]. Человек, рассказывающий историю своего обучения и работы, естественным образом расставляет акценты, называет причины решений и фиксирует точки,

где система ему помогла или подвела.

В исследовании приняли участие 24 респондента из трех групп: преподаватели и администраторы вузов, инженеры-практики с производственным опытом и представители индустрии — работодатели и руководители технических подразделений. Выборка формировалась методом «снежного кома» с контролем разнообразия траекторий. Интервью проводились в 8 российских городах и 1 зарубежном, что позволило сопоставить отечественный и международный контекст.

Каждое интервью длилось 40–60 минут,

записывалось с согласия участников и полностью транскрибировалось. Анализ проходил в несколько итерационных циклов: гайд корректировался после первых интервью по мере появления новых тем, команда регулярно проводила рефлексивные сессии для согласования интерпретаций [14]. В результате шести аналитических стадий было закодировано 1 176 цитат, сгруппированных в 6 тематических блоков и 50 кодов. Суммарные трудозатраты составили 548 человеко-часов [3].

Анализируя систему инженерного образования, важно разграничить два разных результата подготовки. Первый — квалификация и набор профессиональных компетенций, которые позволяют выполнять конкретные задачи [9]. Второй — нечто принципиально иное: картина мира, устойчивая профессиональная позиция и способность взаимодействовать с самыми разными участниками процесса, не теряя при этом инженерного взгляда на вещи [15]. Первый

Основная часть

Анализ 1 176 кодированных цитат из интервью позволил выделить четыре барьера, которые воспроизводятся независимо от региона, отрасли и типа учебного заведения. Они не уникальны для транспорта, но в транспортной сфере, где цена ошибки велика, каждый из них ощущается особенно остро.

Первый и самый очевидный барьер — хроническое отставание учебных программ от реальных технологий. Проблема здесь не в том, что преподаватели не знают нового. Проблема структурная: между появлением технологии и ее включением в учебный план проходят годы согласований, переработок, утверждений. К моменту, когда курс наконец выходит в рабочей версии, сама технология успевает измениться.

Респондент Ю.: «Это большая беда: между появлением технологии и ее включением в учебные программы проходит слишком большой лаг. Пока пишут программы и готовят курсы, к моменту их нормальной версии технология уже успевает устареть».

Другой респондент добавляет конкретику: студент учится на устаревшем программном обеспечении, приходит на производство и вынужден переучиваться с нуля, это стоит работодателю денег и времени. Особенно болезненно это проявляется в ситуации с искусственным интеллектом (ИИ): инструменты ИИ уже стали частью повседневной инженерной работы, однако вузы пока не знают, как с ними обращаться. Запрещать бессмысленно, а учить грамотно работать

результат в значительной степени обеспечивается действующей системой высшего образования в России. Со вторым результатом значительно сложнее, и именно этот разрыв фиксируют участники нашего исследования, описывая переломные моменты своего профессионального становления.

Это не только российская проблема. Международное исследование «Reshaping Engineering Education», охватившее опыт инженерных факультетов в нескольких странах, фиксирует устойчивый глобальный разрыв: работодатели в числе ключевых требований к инженерам называют коммуникацию, командную работу, критическое мышление и способность действовать в условиях неопределенности [15]. Академические программы при этом по-прежнему сосредоточены на технических дисциплинах, а «мягкие» компетенции остаются факультативными [9]. Российское инженерное образование воспроизводит эту же логику [10].

с современными технологиями и критически проверять результаты — практика только-только нарабатывается в режиме реального времени [3].

Второй барьер — слабая связь обучения с реальной практикой. Студенты годами работают с теоретическими моделями и виртуальными симуляциями, не получая доступа к настоящему оборудованию. Один из участников исследования настаивает: нужно давать возможность ошибаться, открывать студентам лаборатории после сдачи техники безопасности и передавать ключи в руки.

Следует отметить, что даже там, где лаборатории есть, доступ к ним часто ограничен регламентами и опасениями за оборудование. В итоге студент оканчивает университет, не имея представления о том, как ведет себя реальная система под нагрузкой, с отказами, с нестандартными ситуациями. Для транспортной отрасли, где именно такие ситуации определяют профессиональный уровень специалиста, это особенно чувствительная проблема.

Третий барьер носит менее очевидный характер, однако его последствия оказываются не менее существенными. Ослабление института наставничества, который ранее обеспечивал передачу профессионального опыта между поколениями специалистов, приводит к тому, что молодые инженеры нередко оказываются лишены системной поддержки на начальном этапе работы.

Респондент М.: «Раньше была такая штука — наставники: ты приходишь на работу — и к кому подойти, что спросить. Сейчас вижу, что этот институт потеряли».

Разрыв между тем, чему учат в аудитории, и тем, что требует реальное производство, в России так и не закрыт — и это фиксируют участники исследования вне зависимости от региона и отрасли. Наставничество выступало важным механизмом передачи профессионального опыта и связующим звеном между образованием и профессиональной практикой. Ослабление этого института приводит к тому, что молодые специалисты сталкиваются с трудностями адаптации к реальным условиям производственной деятельности.

Четвертый барьер стоит особняком, его, как нам кажется, труднее всего признать. Речь о коммуникативных навыках, умении работать в команде, способности договариваться. Технические программы традиционно считают все это второстепенным — мягким, факультативным, не инженерным. Между тем именно это называют дефицитом и работодатели в России, и исследователи по всему миру. Авторы монографии

Рекомендации

Рассматриваемые барьеры обусловлены не недостатком профессиональной компетентности участников системы. Преподаватели понимают проблемы, работодатели их формулируют, студенты ощущают на себе. Проблема заключается в другом: каждый участник системы действует в своей логике, кроме того, слабо проработаны механизмы ответственности за цепочку целиком — от поступления до первых лет работы на производстве. Поэтому сформулированные ниже рекомендации адресованы широкому кругу участников образовательной и отраслевой системы.

Возвращение практики в центр учебного плана и переосмысление формата

Практика в нынешнем виде часто сводится к формальному присутствию студента на предприятии. Исследование показывает: студентам необходимо два принципиально разных режима работы, и оба важны [3]. К первому отнесем режим «песочницы»: открытые лаборатории, хакатоны, учебные проекты, где можно ошибаться без тяжелых последствий. Именно так формируется инициатива и готовность действовать в условиях неопределенности. Второй режим — работа в реальных ограничениях: ГОСТы, регламенты, дедлайны, ответственность за результат. Это воспитывает дисциплину, без которой в транспортной отрасли нельзя.

Рекомендуемая логика учебного плана выглядит так: «песочница» на младших курсах — это

«Reshaping Engineering Education» фиксируют: корпоративный мир давно расставил приоритеты иначе, чем академическая среда, и коммуникация стоит в этом списке наравне с техническими знаниями [15].

Респондент П.: «Основные проблемы — взаимопонимание. Фраза «А это подразумевалось» — фундамент конфликтов».

Инженеру, работающему в сложных технических системах — будь то сигнализация в метро или диспетчерский центр аэропорта, — нужно не только уметь найти неисправность, но и объяснить свои решения коллегам, согласовать их с руководством, передать знания следующему. Однако образовательные программы инженерных вузов пока редко включают курсы, направленные на развитие коммуникативных и переговорных компетенций, что в дальнейшем приводит к дополнительным организационным издержкам для предприятий отрасли.

открытые задачи без единственно правильного ответа, право на ошибку, первый контакт с реальным оборудованием. На старших — регламентированные проекты с индустриальными партнерами, где есть дедлайны, ГОСТы и ответственность за результат. Именно такую модель уже реализует федеральный проект «Передовые инженерные школы». Например, в рамках передовой инженерной школы (ПИШ) «Академия ВСМ» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)) студенты разработали систему мониторинга строительства высокоскоростной магистрали, включающую онлайн-камеры, дроны, спутниковые снимки и ортофотопланы высокой точности. С 2025 года эта система используется Координационным центром Правительства РФ для контроля реализации проекта ВСМ Москва — Санкт-Петербург [6].

Однако ПИШ — это пока элитный трек. На 6 тысяч мест в инженерных школах в 2024 году претендовали около 58 тысяч студентов. Остальные 52 тысячи возвращаются в обычную систему — с той же программой, что была до появления ПИШ. При дефиците отрасли в сотни тысяч специалистов такой охват не решает проблему. Данные нашего исследования показывают, что проблемно-ориентированный опыт формирует инженерное мышление независимо от институционального статуса программы: он появляется у тех, кто работал с первого курса, у тех, кому повезло с наставником, у тех, кто случайно попал на реальный проект. Механизм работает — его можно воспроизвести без специального статуса

и миллиардного финансирования. Для этого достаточно наставника-практика, доступа к реальному оборудованию и задачи с открытым ответом. Не обязательно иметь Росатом в партнерах — достаточно местного предприятия с конкретной

Восстановление наставничества как института, а не акта доброй воли

Сегодня наставничество существует там, где нашелся опытный инженер, который по своей инициативе захотел передать знания. Это случайность, а не система. Наставничество нужно институционализировать: закрепить как обязательный компонент программы с четким коэффициентом: оптимально 3–5 студентов на одного ментора из индустрии. Для транспортных предприятий это

Сокращение времени внедрения педагогических и технологических инноваций через партнерство, а не через согласования

Обновить учебный план через Минобрнауки за один год невозможно. Исследование и практика передовых инженерных школ указывают на другой путь: индустриальный партнер приходит в вуз не с деньгами на именную аудиторию, а с реальной задачей и актуальной технологией [5]. Студенты работают над этой задачей в рам-

Новые метрики

Качество подготовки в вузах сейчас оценивается преимущественно по показателям, которые легко собрать: баллы ЕГЭ, публикации, процент трудоустройства. Все это важно, но ни один из этих показателей не отвечает на вопрос: через сколько месяцев выпускник начинает работать самостоятельно и приносить результат? Необходимо разработка другого набора метрик: сред-

Заключение

Проблема подготовки инженерных кадров для транспортной отрасли не нова, но сегодня она приобретает новое измерение. Технологии меняются быстрее, чем успевают перестраиваться программы. Беспилотный транспорт, цифровое управление инфраструктурой, высокоскоростные магистрали — все это требует специалистов, которых система пока не готовит в нужном количестве и с нужным качеством. Прогнозируемый дефицит в 15–20% по отрасли показывает, что это структурная проблема [5].

Исследование, результаты которого легли в основу этой статьи, позволило увидеть проблему изнутри — глазами тех, кто учит, учится и нанимает. Картина, которая сложилась из 1 176 кодированных фрагментов разговоров с инженерами,

проблемой. Мы рекомендуем распространить логику проблемно-ориентированного обучения на основные программы инженерной подготовки, сделав ее не привилегией отдельных школ, а стандартом для всей системы.

означает конкретное организационное решение: выделить ставки наставников, предусмотреть для них время и мотивацию. Пул опытных специалистов предпенсионного и пенсионного возраста, которые есть в РЖД, Московском метрополитене, авиакомпаниях, — ресурс, который пока почти не используется.

как учебного проекта и получают доступ к тому, что ни в каком учебнике еще не написано. Такой формат не требует многолетних согласований. Он требует воли с обеих сторон и понимания, что именно предприятие получает взамен: молодых специалистов, уже знакомых с его технологиями, и право первой очереди на лучших выпускников.

нее время выхода выпускника на продуктивность у работодателя, индекс удовлетворенности наставничеством, доля практико-ориентированных модулей в учебном плане [11]. Эти данные нужно собирать регулярно в том числе через год после выпуска. Только тогда у вуза появится обратная связь, достаточно точная для осмысленных изменений.

преподавателями и работодателями, оказалась одновременно тревожной и обнадеживающей. Тревожной — потому что разрывы системные и воспроизводятся независимо от региона и отрасли. Обнадеживающей — потому что они названы, описаны и поддаются устранению.

Четыре ключевых барьера, такие как отставание образовательных программ от технологий, слабая связь с реальным производством, утрата института наставничества и дефицит коммуникативных навыков, не требуют революции для преодоления. Они требуют последовательных, скоординированных действий со стороны вузов и предприятий одновременно. Пока каждый участник процесса действует в своей логике, система воспроизводит те же сбои.

Транспортная отрасль располагает рядом структурных условий, которые делают ее перспективной площадкой для системных изменений в инженерном образовании [8, 9]. Здесь сосредоточены крупные работодатели с устойчивым кадровым запросом, профильные вузы с необходимой инфраструктурой и накопленным методическим опытом, а также действующая нормативная база, в частности концепция подготовки кадров для транспортного комплекса России до 2035 года.

Показательно, что транспортные вузы демонстрируют одну из наиболее высоких динамик в рамках проекта передовых инженерных школ, последовательно переходя в более высокие группы финансирования [6, 7]. Вместе с тем потенциал этих ресурсов реализуется преимущественно на уровне отдельных программ. Задача следующего этапа — формирование устойчивых связей между университетами, предприятиями и регуляторами на уровне массовой инженерной подготовки, а не только в рамках специализированных треков.

Список литературы

1. В России до 2045 года построят пять высокоскоростных магистралей // ТАСС: [сайт].— 2025.— 19 ноября.— URL: <https://tass.ru/ekonomika/25664807> (дата обращения: 03.03.2026).
2. Ваньке А. В., Полухина Е. В., Стрельникова А. В. Как собрать данные в полевом качественном исследовании.— М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2020.— 256 с.
3. Гринёва О. О., Вьюнова Д. С. Разработка образовательных программ инженерной подготовки в России на основе данных маркетингового исследования потребностей и ожиданий участников рынка инженерного образования // Маркетинг и маркетинговые исследования.— 2026.— Т. 31.— № 2.— DOI: 10.18334/marketing.31.2.124810.— EDN XMLBPY.
4. Данченко Л. А., Кулакова Е. Ю. Развитие подходов к маркетинговым исследованиям и продвижению бизнес-образования в условиях цифровизации // Маркетинг и маркетинговые исследования.— 2025.— Т. 30.— № 1.— С. 49–68.
5. Климов А. А. Интервью о кадровом дефиците в транспортной отрасли // Сириус. Журнал для тех, кто думает о будущем: [сайт].— 2026.— 20 янв.— URL: <https://siriusmag.ru/articles/3062-doroga-v-professiu-problemy-i-reseniya-pri-podgotovke-transportnikov/> (дата обращения: 03.03.2026).
6. ПИШ второй волны представят результаты работы за 2025 год // Социоцентр: [сайт].— 2026.— 24 февр.— URL: <https://sociocenter.info/press/news/pish-vtoroy-volny-predstavlyat-rezultaty-raboty-za-2025-god> (дата обращения: 03.03.2026).
7. РYT впервые вошёл в первую группу федерального проекта «Передовые инженерные школы» // Министерство транспорта Российской Федерации: [сайт].— 2026.— 3 марта.— URL: <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/12466> (дата обращения: 03.03.2026).
8. Саенко Л. П. История и современное состояние инженерно-технического образования в России // Международное образование и сотрудничество: сборник научных трудов по материалам X Международной научно-практической конференции, Москва, 21 апреля 2023 года.— Вып. 17.— М.: «Техполиграфцентр», 2023.— С. 172–177.
9. Хузиева Э. Ф. Факторы качества инженерного образования / Э. Ф. Хузиева // Инженерное образование: содержание, технологии и оценка качества: материалы международной научно-практической конференции, Казань, 29–30 мая 2025 года.— Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2025.— С. 281–286.
10. Царькова Е. А., Станулевич О. Е., Павлова О. А., Терещенкова Е. В. Кадры для транспортной отрасли: «точки роста» и проекты // Техник транспорта: образование и практика.— 2022.— Т. 3.— Вып. 1.— С. 17–26.— DOI: 10.46684/2687–1033.2022.1.17–26.
11. Ширяев И. М. и др. Метрики для измерения эффективности образовательных и научных организаций: проблемы и перспективы применения // Journal of Economic Regulation.— 2018.— Т. 9.— № 4.— С. 178–191.— DOI: 10.17835/2078–5429.2018.9.4.178–191.
12. Эксперты допустили рост дефицита персонала в логистике к 2030 году на 50% // ТАСС: [сайт].— 2024.— 29 авг.— URL: <https://tass.ru/ekonomika/21712169> (дата обращения: 03.03.2026).
13. Brinkmann S. Qualitative Interviewing. Conversational Knowledge Through Research Interviews.— Oxford: Oxford University Press, 2022.— 192 p.
14. De Fina A., Georgakopoulou A. The Handbook of Narrative Analysis.— New York: John Wiley & Sons, 2012.
15. Habbal F., Al-Ataby A., Hasan M. A. et al. Reshaping Engineering Education: A Critical Review of Curriculum Innovation.— Singapore: Springer, 2024.— DOI: 10.1007/978–981–99–5873–3.

References

1. V Rossii do 2045 goda postroiat pyat vysokoskorostnykh magistralей [Russia to build five high-speed mainlines by 2045] // TASS [TASS News Agency].— 2025.— 19 November.— Available at: <https://tass.ru/ekonomika/25664807> (accessed: 03.03.2026). (In Russ.)
2. Vanke A. V., Polukhina E. V., Strelnikova A. V. Kak sobrat dannye v polevom kachestvennom issledovanii [How to collect data in qualitative field research].— Moscow: HSE Publishing House, 2020.— 256 p. (In Russ.)
3. Grineva O. O., Vyunova D. S. Razrabotka obrazovatelnykh programm inzhenernoj podgotovki v Rossii na osnove dannykh marketingovogo issledovaniya potrebnostej i ozhidaniy uchastnikov rynka inzhenernogo obrazovaniya [Development of engineering education programmes in Russia based on market research data on the needs and expectations of engineering education stakeholders] // Marketing i marketingovyie issledovaniya [Marketing and Market Research].— 2026.— Vol. 31.— No. 2.— DOI: 10.18334/marketing.31.2.124810.— EDN XMLBPY. (In Russ.)
4. Danchenok L. A., Kulakova E. Yu. Razvitiie podkhodov k marketingovym issledovaniyam i prodvizheniyu biznes-obrazovaniya v usloviyakh tsifrovizatsii [Development of approaches to marketing research and promotion of business education in the context of digitalisation] // Marketing i marketingovyie issledovaniya [Marketing and Market Research].— 2025.— Vol. 30.— No. 1.— P. 49–68. (In Russ.)
5. Klimov A. A. Intervyu o kadrovom defitsite v transportnoj otrasli [Interview on the personnel shortage in the transport sector] // Sirius. Zhurnal dlya tekhn, kto dumaet o budushchem [Sirius. A Journal for Those Who Think About the Future].— 2026.— 20 January.— Available at: <https://siriusmag.ru/articles/3062-doroga-v-professiu-problemy-i-reseniya-pri-podgotovke-transportnikov/> (accessed: 03.03.2026). (In Russ.)
6. PISh vtoroj volny predstavlyat rezultaty raboty za 2025 god [Advanced Engineering Schools of the second wave to present 2025 results] // Sociotsentr [Sociocenter].— 2026.— 24 February.— Available at: <https://sociocenter.info/press/news/pish-vtoroy-volny-predstavlyat-rezultaty-rabotyzha-2025-god> (accessed: 03.03.2026). (In Russ.)
7. RUT pervyye voshly v pervuyu gruppu federalnogo proekta «Peredovyye inzhenernyie shkoly» [RUT entered the first group of the Advanced Engineering Schools federal project for the first time] // Ministerstvo transporta Rossijskoj Federatsii [Ministry of Transport of the Russian Federation].— 2026.— 3 March.— Available at: <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/12466> (accessed: 03.03.2026). (In Russ.)
8. Saenko L. P. Istoriya i sovremennoe sostoyanie inzhenerno-tehnicheskogo obrazovaniya v Rossii [History and current state of engineering and technical education in Russia] // Mezhdunarodnoe obrazovanie i sotrudnichestvo: sbornik nauchnykh trudov po materialam X Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii.— Moscow, 21 April 2023.— Vol. 17.— Moscow: Tekhpograftsentr Publ., 2023.— P. 172–177. (In Russ.)
9. Khuzieva E. F. Faktory kachestva inzhenernogo obrazovaniya [Factors of engineering education quality] // Inzhenernoe obrazovanie: sodержanie, tekhnologii i otsenka kachestva: materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii.— Kazan, 29–30 May 2025.— Kazan: Kazan State Power Engineering University Publ., 2025.— P. 281–286. (In Russ.)
10. Tsarkova E. A., Stanulevich O. E., Pavlova O. A., Tereshchenkova E. V. Kadry dlya transportnoj otrasli: «tochki rosta» i proekty [Personnel for the transport sector: growth points and projects] // Tekhnika transporta: obrazovanie i praktika [Transport Engineer: Education and Practice].— 2022.— Vol. 3.— No. 1.— P. 17–26.— DOI: 10.46684/2687–1033.2022.1.17–26. (In Russ.)
11. Shiryaev I. M. et al. Metriki dlya izmereniya effektivnosti obrazovatelnykh i nauchnykh organizatsij: problemy i perspektivy primeneniya [Metrics for measuring the effectiveness of educational and research organisations: challenges and prospects] // Journal of Economic Regulation.— 2018.— Vol. 9.— No. 4.— P. 178–191.— DOI: 10.17835/2078–5429.2018.9.4.178–191. (In Russ.)
12. Eksperty dopustili rost defitsita personala v logistike k 2030 godu na 50% [Experts project a 50% increase in logistics personnel shortage by 2030] // TASS [TASS News Agency].— 2024.— 29 August.— Available at: <https://tass.ru/ekonomika/21712169> (accessed: 03.03.2026). (In Russ.)
13. Brinkmann S. Qualitative Interviewing. Conversational Knowledge Through Research Interviews.— Oxford: Oxford University Press, 2022.— 192 p.
14. De Fina A., Georgakopoulou A. The Handbook of Narrative Analysis.— New York: John Wiley & Sons, 2012.
15. Habbal F., Al-Ataby A., Hasan M. A. et al. Reshaping Engineering Education: A Critical Review of Curriculum Innovation.— Singapore: Springer, 2024.— DOI: 10.1007/978–981–99–5873–3.

Сведения об авторах	Information about the authors
Гринева Ольга Олеговна кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры «Реклама, связи с общественностью и дизайн» ФГБОУ ВО «Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова» Адрес: РЭУ им. Г. В. Плеханова, 115054, г. Москва, Стремянный переулок, д. 36 ORCID: 0000-0001-6348-4653 E-mail: O.grineva@gmail.com	Grineva Olga Olegovna Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Advertising, Public Relations and Design, Plekhanov Russian University of Economics (PRUE) Address: Plekhanov Russian University of Economics, 36 Stremyanny Lane, Moscow, 115054, Russia ORCID: 0000-0001-6348-4653 E-mail: O.grineva@gmail.com
Вьюнова Дарья Сергеевна кандидат педагогических наук, руководитель Центра дидактики профессионального образования ГАОУ ВО «Московский городской педагогический университет» Адрес: МГПУ, 129226, г. Москва, 2-й Сельскохозяйственный проезд, д. 4, корп. 1 ORCID: 0009-0000-1379-7731 E-mail: VyunovaDS@mgpu.ru	Vyunova Darya Sergeevna Candidate of Pedagogical Sciences, Head of the Centre for Didactics of Professional Education, Moscow City University (MCU) Address: Moscow City University, 4/1 2nd Selskokhozyajstvennyj Proezd, Moscow, 129226, Russia ORCID: 0009-0000-1379-7731 E-mail: VyunovaDS@mgpu.ru
Кларин Михаил Владимирович доктор педагогических наук, член-корреспондент Российской академии образования, научный руководитель Центра дидактики профессионального образования ГАОУ ВО «Московский городской педагогический университет» Адрес: МГПУ, 129226, г. Москва, 2-й Сельскохозяйственный проезд, д. 4, корп. 1 ORCID: 0000-0003-3455-6560 E-mail: consult@klarin.ru	Klarin Mikhail Vladimirovich Doctor of Pedagogical Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Education, Academic Director of the Centre for Didactics of Professional Education, Moscow City University (MCU) Address: Moscow City University, 4/1 2nd Selskokhozyajstvennyj Proezd, Moscow, 129226, Russia ORCID: 0000-0003-3455-6560 E-mail: consult@klarin.ru
Лопатинская Ирина Валентиновна кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры «Маркетинг» ФГБОУ ВО «Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова» Адрес: РЭУ им. Г. В. Плеханова, 115054, г. Москва, Стремянный переулок, д. 36 ORCID: 0009-0005-4806-5879 E-mail: Lopatinskaya.IV@rea.ru	Lopatinskaya Irina Valentinovna Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Marketing, Plekhanov Russian University of Economics (PRUE) Address: Plekhanov Russian University of Economics, 36 Stremyanny Lane, Moscow, 115054, Russia ORCID: 0009-0005-4806-5879 E-mail: Lopatinskaya.IV@rea.ru

Статья получена 26.01.2026 | статья опубликована 25.03.2026

Article received 26.01.2026 | Article published 25.03.2026



МосТрансПроект

155N 3034-5182

26701



9 773034 516007

