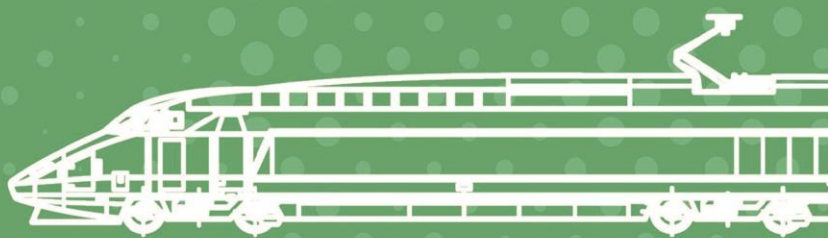


ISSN 2415-8658



**ТРАНСПОРТ
АЗИАТСКО-ТИХООКЕАНСКОГО
РЕГИОНА**

**PACIFIC RIM COUNTRIES
TRANSPORTATION SYSTEM**



№ 4(45) 2025

Научный журнал
Издается с марта 2013 г.
Периодичность: 4 номера в год
ISSN 2415-8658
Подписной индекс
в общероссийском каталоге
ООО «Урал-Пресс Округ» – 25213

Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона

№ 4(45) 2025

Главный редактор

Давыдов Юрий Анатольевич, доктор технических наук, профессор, действительный член Российской академии транспорта

Заместители главного редактора

Нератова Оксана Анатольевна, кандидат технических наук
Мальшева Ольга Александровна, кандидат технических наук

Редакционная коллегия

Буровцев Владимир Викторович, доктор экономических наук, профессор, действительный член Российской академии транспорта, ДВГУПС, г. Хабаровск
Анисимов Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор, ПГУПС, г. Санкт-Петербург
Годяев Александр Иванович, доктор технических наук, доцент, ДВГУПС, г. Хабаровск
Жданова Светлана Мирзахановна, доктор технических наук, доцент, ДВГУПС, г. Хабаровск
Игнатенко Иван Владимирович, кандидат технических наук, доцент, ДВГУПС, г. Хабаровск
Квашук Сергей Владимирович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, ДВГУПС, г. Хабаровск
Кравчук Валерий Андреевич, доктор технических наук, профессор, ТОГУ, г. Хабаровск
Кудрявцев Сергей Анатольевич, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии архитектуры и строительных наук, ДВГУПС, г. Хабаровск
Кулинич Юрий Михайлович, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Академии электротехнических наук РФ, ДВГУПС, г. Хабаровск
Ли Валерий Николаевич, доктор технических наук, профессор, действительный член Академии электротехнических наук РФ, ДВГУПС, г. Хабаровск

Нестерова Наталья Станиславовна, доктор технических наук, доцент, ДВГУПС, г. Хабаровск
Парамонов Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор, член российского и международного общества по геотехнике и фундаментостроению (РОМГТИФ и ISSMGE), ПГУПС, г. Санкт-Петербург
Пиотрович Алексей Анатольевич, доктор технических наук, доцент, ДВГУПС, г. Хабаровск
Пугачев Игорь Николаевич, доктор технических наук, профессор, действительный член Российской академии транспорта, ДВГУПС, г. Хабаровск
Стойнович Геннадий Михайлович, доктор технических наук, доцент, почетный работник науки и техники РФ, ДВГУПС, г. Хабаровск
Железнов Дмитрий Валерианович, доктор технических наук, профессор, ПАО «Трансконтейнер», г. Москва
Рахимов Рустам Вячеславович, доктор технических наук, профессор, ТГТУ, Узбекистан
Сериков Александр Владимирович, доктор технических наук, доцент, КНАГУ, г. Комсомольск-на-Амуре
Федюк Роман Сергеевич, доктор технических наук, профессор, ДВФУ, г. Владивосток
Числов Олег Николаевич, доктор технических наук, профессор, РГУПС, г. Ростов-на-Дону
Ма Юньдун, профессор, Даляньский транспортный университет, г. Далянь, КНР
Чэнь Бинчжи, профессор, Даляньский транспортный университет, г. Далянь, КНР
Ли Вэйдун, профессор, Даляньский транспортный университет, г. Далянь, КНР
Цзян Алань, профессор, Даляньский транспортный университет, г. Далянь, КНР
Чжан Чжанвон, профессор, Корейский национальный университет транспорта, г. Ыйван, Республика Корея

В соответствии с распоряжением ВАК РФ от 22.11.2022 г. № 1482-р научный журнал «Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона» включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по следующим научным специальностям:

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки).
2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки).
2.1.7. Технология и организация строительства (технические науки).
2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки).
2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки).
2.4.5. Энергетические системы и комплексы (технические науки).

2.9.1. Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте (технические науки).
2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог (технические науки).
2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация (технические науки).
2.9.4. Управление процессами перевозок (технические науки).
2.9.8. Интеллектуальные транспортные системы (технические науки).
2.9.9. Логистические транспортные системы (технические науки).

Сотрудники редакции

редактор, переводчик – Заикина Светлана Сергеевна
технический редактор – Ларионова Надежда Викторовна

Учредитель

680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, д. 47
Дальневосточный государственный университет путей сообщения

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-51966 от 29 ноября 2012 г. выдано Роскомнадзором.

Отпечатано в издательстве ДВГУПС.
680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47.

Адрес редакции

680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47, каб. 359
Дальневосточный государственный университет путей сообщения, тел./факс: (4212) 40-77-65
E-mail: apr-journal-ed@list.ru
Сайт: tratr.dvgups.ru

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей. При перепечатке ссылка на журнал «Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона» обязательна.

Журнал обрабатывается в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Подписано в печать 24.12.2025. Дата выхода в свет 25.12.2025.
Заказ 200. Усл. печ. л. 14,0. Тираж 500 экз.
(1-й завод 1–40 экз.). Цена свободная.

Pacific Rim countries transportation system

Scientific Journal

Issued since March 2013

Frequency: 4 issues a year

ISSN 2415-8658

Subscription index

LLC «Ural-Press Okrug» – 25213

№ 4(45) 2025

Chief Editor

Davydov Yuriy Anatol'evich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Academician of the Russian Transport Academy

Deputy Chief Editors

Neratova Oksana Anatol'evna, Ph.D., Associate Professor
Malysheva Olga Aleksandrovna, Ph.D., Associate Professor

Editorial Board

Burovtsev Vladimir Viktorovich, Doctor of Science (Economics), Professor, Academician of the Russian Transport Academy, FESTU, Khabarovsk

Anisimov Vladimir Aleksandrovich, Doctor of Science (Engineering), Associate Professor, PGUPS, Saint Petersburg

Godyaev Aleksandr Ivanovich, Doctor of Science (Engineering), Associate Professor, FESTU, Khabarovsk

Zhdanova Svetlana Mirzakhonovna, Doctor of Science (Engineering), FESTU, Khabarovsk

Ignatenko Ivan Vladimirovich, Ph.D, Associate Professor FESTU, Khabarovsk

Kvashuk Sergey Vladimirovich, Doctor of Science (Geology and Mineralogy), Associate Professor, FESTU, Khabarovsk

Kravchuk Valeriy Andreevich, Doctor of Science (Engineering), Professor, FESTU, Khabarovsk

Kudryavtsev Sergey Anatol'evich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, FESTU, Khabarovsk

Kulinich Yuriy Mikhailovich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Corresponding Member of the Academy of Electrotechnical Sciences of the Russian Federation, FESTU, Khabarovsk

Li Valeriy Nikolaevich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Full member of the Academy of Electrotechnical Sciences of the Russian Federation, FESTU, Khabarovsk

Piotrovich Aleksey Anatol'evich, Doctor of Science (Engineering), Associate Professor, FESTU, Khabarovsk

Pugachev Igor Nikolaevich, Doctor of Science (Engineering), Professor, FESTU, Khabarovsk

Nesterova Natalya Stanislavovna, Doctor of Science (Engineering), Associate Professor, FESTU, Khabarovsk

Stoyanovich Gennadiy Mikhailovich, Doctor of Science (Engineering), Associate professor, Honorary Worker of Science and Technology of the Russian Federation, FESTU, Khabarovsk

Zheleznov Dmitrii Valerianovich, Doctor of Science (Engineering), Professor, «Transcontainer» PJSC, Moscow

Rakhimov Rustam Vyacheslavovich, Doctor of Science (Engineering) Sciences, Professor, TSTU, Uzbekistan

Paramonov Vladimir Nikolaevich, Doctor of Science (Engineering), Associate Professor, Member of the Russian and International Society for Geotechnics and Foundation Engineering (RSSMGFE and ISSMGE), PGUPS, Saint Petersburg

Serikov Aleksandr Vladimirovich, Doctor of Science (Engineering), Associate Professor, KNASTU, Komsomolsk-on-Amur

Fediuk Roman Sergeevich, Doctor of Science (Engineering), Professor, FEFU, Vladivostok

Chislov Oleg Nikolaevich, Doctor of Science (Engineering), Professor, RSTU, Rostov-on-Don

Ma Yundong, Professor, Dalian Jiaotong University, Dalian, P.R. China

Chen Bingzhi, Professor, Dalian Jiaotong University, Dalian, P.R. China

Li Weidong, Professor, Dalian Jiaotong University, Dalian, P.R. China

Jiang Alan, Professor, Dalian Jiaotong University, Dalian, P.R. China

Jin Jangwon, Ph.D., Korea National University of Transportation, Uiwang, Republic of Korea

The Journal is licensed and indexed by the State Commission for Higher Degrees and titles (VAK RF order № 1482-r, 22.11.2022); it is included in the list of journals where the main scientific results of dissertations for obtaining the scientific degree of Candidates of Sciences and Doctors of Sciences should be published (according to the following specialties):

2.1.1. Structures and buildings (Technical sciences).

2.1.2. Foundations and underground structures (Technical sciences).

2.1.7. Construction technology and organization (Technical sciences).

2.1.8. Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels (Engineering sciences).

2.4.2. Electrical complexes and systems (Technical sciences).

2.4.5. Energy systems and complexes (Technical sciences).

2.9.1. Transport and transport-technological systems of the country, its regions and cities, organization of production in transport (Technical sciences).

2.9.2. Railway track, survey and design of railroads (Technical sciences).

2.9.3. Rolling stock of railroads, traction and electrification (Technical sciences).

2.9.4. Transportation process management (Technical sciences).

2.9.8. Intelligent transport systems (Technical sciences).

2.9.9. Logistic transport systems (Technical sciences).

Editorial Staff

Editor, Translator – Zaikina Svetlana Sergeevna
Technical Editor – Larionova Nadezhda Viktorovna

Founder

680021, Khabarovsk, Serysheva, 47
Far Eastern State Transport University

Mass media Registration Certificate PI,
Number FS77-51966, November 29, 2012,
issued by Roskomnadzor.

Printed at Far Eastern State Transport University
Publishing Center.

Editorial office address and contacts

680021, Khabarovsk, Serysheva St., 47, room 359
Far Eastern State University, tel./fax: (4212) 40-77-65.
E-mail: apr-journal-ed@list.ru
Website: tratr.dvgups.ru

The editorial opinion may not coincide with the opinion of the authors of articles. At reprinting the reference to the journal is obligatory.

The journal is indexed in the Russian Science Citation Index (RSCI).

Signed in print 24.12.2025. Publication date 25.12.2025.
Order 200. P. 14,0. Circulation 500 copies
(1st plant 1–40 copies). Free price.

СОДЕРЖАНИЕ

.....	
Архит Б., Оленцевич В.А. ИНТЕГРИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУР КОНТРОЛЯ НОВЫХ МАРШРУТОВ МОНГОЛЬСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ	5
Афанасенко А.А., Яцевич П.П. УГЛЕРОДНЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ДОРОЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА: МОДИФИКАЦИЯ БИТУМНЫХ ВЯЖУЩИХ И АСФАЛЬТОБЕТОНОВ.....	14
Брытков В.С. СОСТОЯНИЕ КОНТЕЙНЕРНОЙ ЛОГИСТИКИ НА ВОСТОЧНОМ ПОЛИГОНЕ В СОВРЕМЕННЫХ ПОЛИТИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ НА ПРИМЕРЕ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТЫ ПАО «ТРАНСКОНТЕЙНЕР»	25
Данильянц Е.С., Пупатенко В.В. СЕЗОННОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОЕЗДОВ НА ГРУНТЫ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА НА УЧАСТКЕ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЙ ДИРЕКЦИИ ИНФРАСТРУКТУРЫ	33
Жигальцова А.С., Кудрявцев С.А., Эсаулов В.А. СПРЯМЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ ПУТИ НА ГОРНО-ПЕРЕВАЛЬНОМ УЧАСТКЕ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ	41
Жильцов А.С., Муровский С.П., Кувшинов В.В., Цалоев В.М., Артёменко И.Д. БЕСПИЛОТНАЯ РОБОТИЗИРОВАННАЯ МОРСКАЯ ПЛАТФОРМА С ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ НА ВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ.....	47
Каменчуков А.В., Пугачев И.Н. КОНЦЕПЦИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ	54
Легкая В.И. ИССЛЕДОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ЭЛЕКТРОПОЕЗДА ПРИ СЛУЧАЙНОМ ВОЗМУЩЕНИИ	58
Меркулов А.В., Годяев А.И. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ПЕРСОНАЛА ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПОЕЗДОВ	68
Нейман В.А., Воронцов Д.С. ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ДЛЯ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ВВОДА РЕЛЬСОВЫХ ПЛЕТЕЙ В РАСЧЕТНУЮ ТЕМПЕРАТУРУ ЗАКРЕПЛЕНИЯ	74
Некрасов К.В., Тихненко С.А. КОНЦЕПЦИЯ ОРГАНИЗАЦИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕВОЗОК СБОРНЫХ ГРУЗОВ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОЛОГИИ КООПЕРАТИВНОЙ КОНСОЛИДАЦИИ	80
Оденбах И.А., Панов Е.И. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОФИЛЕЙ ОСАДКОВ ОСНОВАНИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ НАСЫПЕЙ ИЗ ГРУНТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ	86
Савин Е.З. ВОЗДЕЙСТВИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ВИБРАЦИЙ ОТ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ПОДВЕСНОЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ КАБЕЛЬ.....	91
Степанов К.Д., Дружинина О.В. КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ВИБРАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ТРАНСПОРТНО- ПЕРЕСАДОЧНЫЙ УЗЕЛ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА	98
Суханов Г.И., Доможирова А.Д. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ГРУЗОПОТОКА НА УЧАСТКЕ ОБРАЩЕНИЯ КОЛЬЦЕВЫХ МАРШРУТНЫХ ПОЕЗДОВ.....	107
Тарасов Е.М., Надежкин В.А., Надежкина С.А. АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПЕРВИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЛЬСОВОЙ ЦЕПИ К ИЗМЕНЕНИЮ ПРОВОДИМОСТИ ИЗОЛЯЦИИ	113
К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ	119

CONTENTS

.....	
Arkhit B., Olentsevich V.A. INTEGRATED SYSTEMS AND MANAGEMENT TOOLS FOR MONGOLEAN RAILWAYS' NEW ROUTES CONTROL STRUCTURES	5
Afanasenko A.A., Yatsevich P.P. CARBON NANOMATERIALS FOR ROAD CONSTRUCTION: MODIFICATION OF BITUMINOUS BINDERS AND ASPHALT CONCRETES	14
Brytkov V.S.	25
THE STATE OF CONTAINER LOGISTICS IN THE EASTERN POLYGON IN MODERN POLITICAL AND ECONOMIC CONDITIONS, EXEMPLIFIED BY ORGANIZATION OF WORK AT TRANSCONTAINER PJSC	25
Daniliants E.S., Pupatenko V.V. SEASONAL VARIATIONS IN THE IMPACT OF TRAINS ON THE EARTHBED SOILS ON THE DVDI SECTION	33
Zhigaltsova A.S., Kudryavtsev S.A., Esaulov V.A. STRAIGHTENING THE TRACK PROFILE ON THE MOUNTAIN PASS SECTION OF THE FAR EASTERN RAILWAY	41
Zhiltsov A.S., Murovsky S.P., Kuvshinov V.V., Tsaloev V.M., Artemenko I.D. UNMANNED ROBOTIC OFFSHORE PLATFORM WITH HYDROGEN FUEL CELL POWER PLANT	47
Kamenchukov A.V., Pugachev I.N. THE CONCEPT OF FORECASTING THE OPERATIONAL CONDITION OF ROAD SURFACES	54
Legkaya V.I. INVESTIGATION OF AN ADAPTIVE AUTOMATIC TRAIN SPEED CONTROL SYSTEM IN CASE OF RANDOM DISTURBANCE	58
Merkulov A.V., Godyaev A.I. USE OF MODERN COMPUTER TECHNOLOGIES IN TRAINING OPERATIONAL PERSONNEL FOR TRAIN TRAFFIC MANAGEMENT	68
Neyman V.A., Vorontsov D.S. APPLICATION OF COMBINED COOLING FOR FORCED ADJUSTMENT OF RAIL STRINGS TO THE DESIGN FASTENING TEMPERATURE.....	74
Nekrasov K.V., Tikhnenko S.A. CONCEPT OF ORGANIZING RAILWAY TRANSPORTATION OF CONSOLIDATED CARGO UNDER COOPERATIVE CONSOLIDATION TECHNOLOGY	80
Odenbakh I.A., Panov E.I. DETERMINATION OF THE SETTLEMENT PROFILES OF RAILWAY EMBANKMENTS MADE OF SOIL MATERIALS	86
Savin E.Z.	91
IMPACT OF MECHANICAL VIBRATIONS FROM ROLLING STOCK ON SUSPENDED FIBER OPTIC CABLE.....	91
Stepanov K.D., Druzhinina O.V. COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF VIBRATIONAL IMPACT ON A TRANSPORT AND TRANSFER HUB USING INTELLIGENT ANALYSIS METHODS	98
Sukhanov G.I., Domojirova A.D. RESTORATION OF CARGO FLOW ON THE SECTION OF CIRCULATION OF SHUTTLE TRAINS	107
Tarasov E.M., Nadezhkin V.A., Nadezhkina S.A. ANALYSIS OF THE SENSITIVITY OF THE PRIMARY PARAMETERS OF THE RAIL CIRCUIT TO CHANGES IN INSULATION CONDUCTIVITY	113
AUTHORS GUIDELINES	120

Научная статья
УДК 656.078
doi:10.31079/2415-8658-2025-4-5-13

ИНТЕГРИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУР КОНТРОЛЯ НОВЫХ МАРШРУТОВ МОНГОЛЬСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Архит Буяннэмэх¹, Оленцевич Виктория Александровна²

^{1,2} Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия

¹ buyan_s@yahoo.com.ru

² olencevich_va@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены перспективы внедрения интегрированных систем управления и средства контроля организации движения поездов на новых маршрутах железных дорог Монголии в контексте формирования эффективной национальной транспортно-логистической стратегии развития страны. Проведён комплексный анализ современного состояния железнодорожной транспортной инфраструктуры страны, выявлены ключевые проблемы действующей системы сигнализации и диспетчеризации, ограничивающие уровень пропускных и провозных мощностей, процесс формирования безопасного перевозочного процесса. Особое внимание уделено международному опыту России, Китая, Южной Кореи и стран Европы, где интегрированные цифровые технологии (ETCS, LTE-R, Balise, системы автоматического мониторинга) доказали свою эффективность в повышении надёжности и снижении эксплуатационных затрат.

Обоснована необходимость создания Единого центра управления движением поездов (ЕЦУД) и поэтапного перехода от релейных систем к цифровым стандартам ETCS с применением интеллектуальных сенсорных сетей. Подчёркивается стратегическая значимость модернизации железнодорожного сектора с целью обеспечения конкурентоспособности экспорта минеральных ресурсов, ускоренного развития транзитного потенциала и интеграции Монголии в международный транспортный коридор «Россия–Монголия–Китай».

Ключевые слова: железные дороги Монголии, уровень пропускных и провозных мощностей, системы сигнализации и диспетчеризации, единый центр управления движением поездов, транзитный потенциал, международный транспортный коридор, инфраструктурный комплекс, интегрированные системы, средства управления структур контроля маршрутов

Original article

INTEGRATED SYSTEMS AND MANAGEMENT TOOLS FOR MONGOLEAN RAILWAYS' NEW ROUTES CONTROL STRUCTURES

Arkhit Buyannemekh¹, Olentsevich Viktoriya A.²

^{1,2} Irkutsk State University of Railway Transport, Irkutsk, Russia

¹ buyan_s@yahoo.com.ru

² olencevich_va@mail.ru

Abstract. In this scientific article, the authors examine the prospects for implementing integrated management systems and means of controlling the organization of train traffic on new railway routes in Mongolia in the context of developing an effective national transport and logistics strategy for the country's development. They conduct a comprehensive analysis of the current state of the country's railway transport infrastructure and identify key issues in the current signaling and dispatching system that limit the level of throughput and carrying capacities as well as the process of creating a safe transportation system. Special attention is paid to the international experience of Russia, China, South Korea and European countries, where integrated digital technologies (ETCS, LTE-R, Balise, and automatic monitoring systems) have proven their effectiveness in improving reliability and reducing operating costs.

The need to establish a unified train traffic control center (UTCC) and to gradually switch from relay systems to digital ETCS standards using intelligent sensor networks is substantiated. The strategic importance of modernizing the railway sector in order to ensure the competitiveness of mineral resources exports, accelerate the development of transit potential and integrate Mongolia into the Russia-Mongolia-China international transport corridor is emphasized.

Keywords: Mongolian railways, level of throughput and carrying capacities, signaling and dispatching systems, unified train traffic control center, transit potential, international transport corridor, infrastructure complex, integrated systems, means of directing route control structures

Введение

Железнодорожный транспорт Монголии всегда играл ключевую роль в успешном развитии экономики страны, обеспечивая экспорт сырьевых ресурсов

и транзитные перевозки между Россией и Китаем. В условиях роста грузопотоков и появления новых маршрутов (Таван-Толгой–Гашуунсухайт, Зуунбаян–Ханги) возникает необходимость перехода

от традиционных методов управления к интегрированным цифровым системам, повышающим уровень безопасности перевозочного процесса и обеспечивающим перспективные параметры пропускных и провозных мощностей сети.

Последние годы железнодорожная политика Монголии представляет собой не просто транспортную стратегию, а комплексный инструмент диверсификации экономики и обеспечения устойчивого роста. Укрепление существующих и создание новых транспортных коридоров создает оптимальные возможности для выхода минеральной продукции не только на рынок Китая и России, а также в страны Азиатско-Тихоокеанского региона. В этом контексте железнодорожная сеть становится ключевым элементом интеграции Монголии в международную логистическую систему и фактором снижения внешнеэкономических рисков [1–3].

Современное состояние и тенденции развития железнодорожной отрасли Монголии

Первая железная дорога в Монголии – узкоколейная линия протяженностью 43 км, построенная в 1938 г., соединила город Улан-Батор с Налайхским, на территории которого находилось крупное угольное месторождение. В дальнейшем в 1949 г. была введена в эксплуатацию ширококолейная железнодорожная линия протяженностью около 400 км, соединившая российский пограничный пункт Наушки через железнодорожную станцию Сухэ-Батор с Улан-Батором. В 1956 г. завершено строительство линии Улан-Батор–Замын-Ууд, что позволило обеспечить стабильное сквозное железнодорожное сообщение с севера на юг страны протяженностью 1110 км. Так завершилось формирование Трансмонгольской железной дороги (ТМЖД) [4–6].

Впоследствии с целью обеспечения добычи и транспортировки минеральных ресурсов построены семь ответвлений, связывающих основные железнодорожные линии с крупными месторождениями: медно-молибденовым (Эрдэнэт), угольными (Налайх, Шарын гол, Багануур), флюоритовым (Бор-Ондор), нефтяным (Зуунбаян) и железорудным (Томортэйн).

В настоящее время в Монголии функционируют:

- Трансмонгольская железная дорога и 7 её ответвлений;
- восточная линия Эрэнцав–Баянтумэн;
- ряд железных дорог южного региона, обслуживающих горнодобывающие предприятия.

Основная железнодорожная сеть управляется совместным предприятием Улан-Баторская железная дорога (УБЖД), созданным на основе советско-монгольского соглашения в 1949 г. на паритетных условиях (50:50). Компания «Монголын томор зам» ведет строительство и производит эксплуатацию действующих железнодорожных линий ТМЖД.

Отдельные линии эксплуатируются специализированными операторами – «Тавантолгой томор зам», «Зуунбаян томор зам», а также частными инвесторами, среди которых крупнейшим является «Болд томор Ерөө», наряду с многочисленными частными транспортными компаниями [4–6].

На 2025 г. протяженность ТМЖД составляет 1611 км, это в основном однопутная, неэлектрифицированная линия ширококолейного стандарта 1520 мм. Провозная способность находится на уровне 30 млн т грузов в год. Сеть включает 75 железнодорожных станций, из которых 44 оборудованы сигнализацией, а 10 являются ключевыми узлами. Технические параметры линии: минимальный радиус кривых – 200 м, максимальный уклон основной линии ТМЖД – 12 ‰ (1,2 ‰). В состав инфраструктурного комплекса входят 442 инженерных сооружения, включая мосты и насыпи. Основное железнодорожное полотно уложено рельсами типа Р-50 и Р-65, на боковых линиях применяются Р-43 и Р-50. В качестве шпал на 81 % полотна дороги используются железобетонные, доля деревянных – 19 %, при этом планомерно осуществляется переход на шпалы отечественного производства [4–7].

Железнодорожная линия Баянтумэн–Эрэнцав соединяет город Чойбалсан с российской границей и обеспечивает выход на Трансманчжурскую и Транссибирскую магистрали. Протяженность составляет 237,6 км, ширина колеи – 1520 мм. Это однопутная неэлектрифицированная дорога с максимальным уклоном 0,9 ‰ и минимальным радиусом кривых 300 м, построенная в 1939 г. на рельсах типа Р-50 с деревянными шпалами. В силу сокращения грузооборота между Россией и Монголией на данный период используется значительно ниже заявленной проектной мощности [6, 7].

В целях увеличения объемов перевозок полезных ископаемых и реализации планов по активному развитию туризма, правительство Монголии реализует масштабную программу модернизации железных дорог, которая включает в себя электрификацию инфраструктурного комплекса, строительство вторых главных путей, замену морально и физически устаревшего тягового подвижного состава, обновление систем сигнализации и связи, усиление верхнего строения пути за счёт повсеместного использования железобетонных шпал [5, 8, 9].

В соответствии с новой политикой развития страны в южных регионах ведется строительство трех новых железнодорожных линий:

- однопутной ширококолейной неэлектрифицированной линии Тавантолгой–Зуунбаян, протяженностью 416 км, соединяющей угольное месторождение Цогтцэций с линией в Зуунбаян и в перспективе позволяющей обеспечить выход через Чойбалсан на железные дороги России и Китая;

- Тавантолгой–Гашуунсухайт, протяженностью 248 км, введенной в эксплуатацию в сентябре 2022 г.

с целью транспортировки коксующегося угля на экспорт в промышленно развитые регионы Северного Китая и через морские порты (Хуанхуа, Тяньцзинь, Циндао, Цзиньчжоу) – на третьи рынки. Заявленная проектная провозная способность составляет 30–50 млн т в год;

– ширококолейной линии Зуунбаян–Ханги, протяженностью 227 км. Цель строительства линии – снижение объемов перегрузки грузов по станции Замын-Ууд и обеспечение возможности реализации перспективных объемов экспорта железной руды и угля в Китай. После полного ввода в эксплуатацию линии протяженность маршрута от станции Ероо до китайской железнодорожной станции Бугат сократится на 318 км (до 1722 км), что позволит существенно снизить транспортные издержки (на 4–8 долл. США за 1 т) и повысить конкурентоспособность монгольской руды на китайском рынке в сравнении с сырьем из Австралии [6, 8–10]. На рис. 1 представлена карта нового инфраструктурного комплекса железных дорог Монголии [8].

Государственная политика Монголии в области развития железнодорожного транспорта

Государственная политика Монголии в области железнодорожного транспорта реализуется в тесной связи с разработкой стратегических месторождений полезных ископаемых и их экспортом на третьи рынки. основополагающим документом, определяющим проектные решения в области развития, модернизации и наращивания мощностей инфраструктурного комплекса железнодорожных дорог выступает «Государственная политика в области железнодорожного транспорта», где предусмотрено поэтапное строительство новой сети, диверсификация транспортных коридоров в направлении Китая и России, а также

формирование вдоль транспортных магистралей промышленных кластеров для выпуска продукции с добавленной стоимостью [2, 6, 8].

Первый этап охватывает около 1040 км железнодорожных линий, соединяющих южные и восточные регионы страны с Китаем и третьими рынками через Транссибирскую и Байкало-Амурскую магистрали с выходом в морской порт Восточный. Данные проекты обеспечивают экспорт угля и меди с крупных месторождений (Тавантолгой, Цагаан суварга и др.). Ввод в эксплуатацию также позволит в 5–10 раз увеличить пассажиропоток, прирост грузопотока ожидается на уровне 50 млн т в год.

Второй этап направлен на соединение стратегических месторождений с пограничными пунктами КНР и РФ, что позволит на 20 % снизить нагрузку на основную ТМЖД. Общая протяженность данных железнодорожных линий составит 3162 км, из них линия Тавантолгой–Гашуун сухайт (267 км), линия Зуунбаян–Ханги (280 км) уже введены в эксплуатацию в 2022 г. Реализация грузопотока монгольского экспорта угля и меди с использованием данных линий уже позволила значительно повысить конкурентоспособность железнодорожного транспорта страны.

Третий этап предусматривает строительство железнодорожной сети протяженностью около 3600 км в западных районах страны.

Данные проекты нацелены на вовлечение местных месторождений в экономический оборот, поддержку демографического роста и регионального развития, а также обеспечение экологического баланса. На сегодняшний день окончательно утверждено только направление Улан-Батор–Хар-хорин протяженностью 330 км [1, 6, 8].



Рис. 1. Карта нового инфраструктурного комплекса железных дорог Монголии

Политика развития железнодорожной отрасли охватывает не только вопросы обновления инфраструктурного комплекса, но и регулирование стандартов колеи (в основном 1520 мм), совершенствование правовой базы, разделение функций между владельцами инфраструктуры и перевозчиками. Финансирование осуществляется за счет государственного бюджета, частных инвестиций и льготных кредитов, при этом предусмотрена дальнейшая передача построенной инфраструктуры в государственную собственность [6, 8, 9, 11].

На рис. 2 представлены маршруты монгольских железных дорог в рамках развития экономического коридора «Монголия–Россия–Китай» до 2030 г. [8].

Проблемы и вызовы существующей системы управления в железнодорожном секторе Монголии

Анализ современного состояния процесса управления и контроля за движением поездов в Монголии позволил выявить ряд существенных ограничений и проблем (табл. 1) [6, 8, 12].

На железнодорожном транспортном рынке Монголии деятельность третьих перевозчиков в основном осуществляется в форме передачи вагонов на стыковых железнодорожных станциях, а также через аренду (lease) инфраструктурных объектов и подвижного состава между компаниями. Однако доминирующее положение имеет УБЖД,

что приводит к ограничению конкуренции: компания отдаёт приоритет собственному парку вагонов и локомотивов, что препятствует равноправному доступу других перевозчиков к инфраструктурному комплексу. Это создаёт риск дефицита вагонного парка и подчёркивает необходимость реформирования нормативной базы с целью обеспечения справедливой конкуренции.

Рынок железнодорожных перевозок Монголии постепенно диверсифицируется, однако, остаётся высокоцентрализованным, что обуславливает необходимость внедрения интегрированных систем управления и развития конкурентной среды [13–15].

Действующая система управления движением поездов в Монголии не соответствует требованиям безопасности, эффективности и интеграции в международные транспортные коридоры. Для её модернизации необходимо:

- внедрение автоматизированных технологий (RFID, CCTV, Balise и др.);
- создание единого центра управления движением (RTCC);
- переход к управлению на основе данных в реальном времени;
- развитие кадрового потенциала и специализированной подготовки.

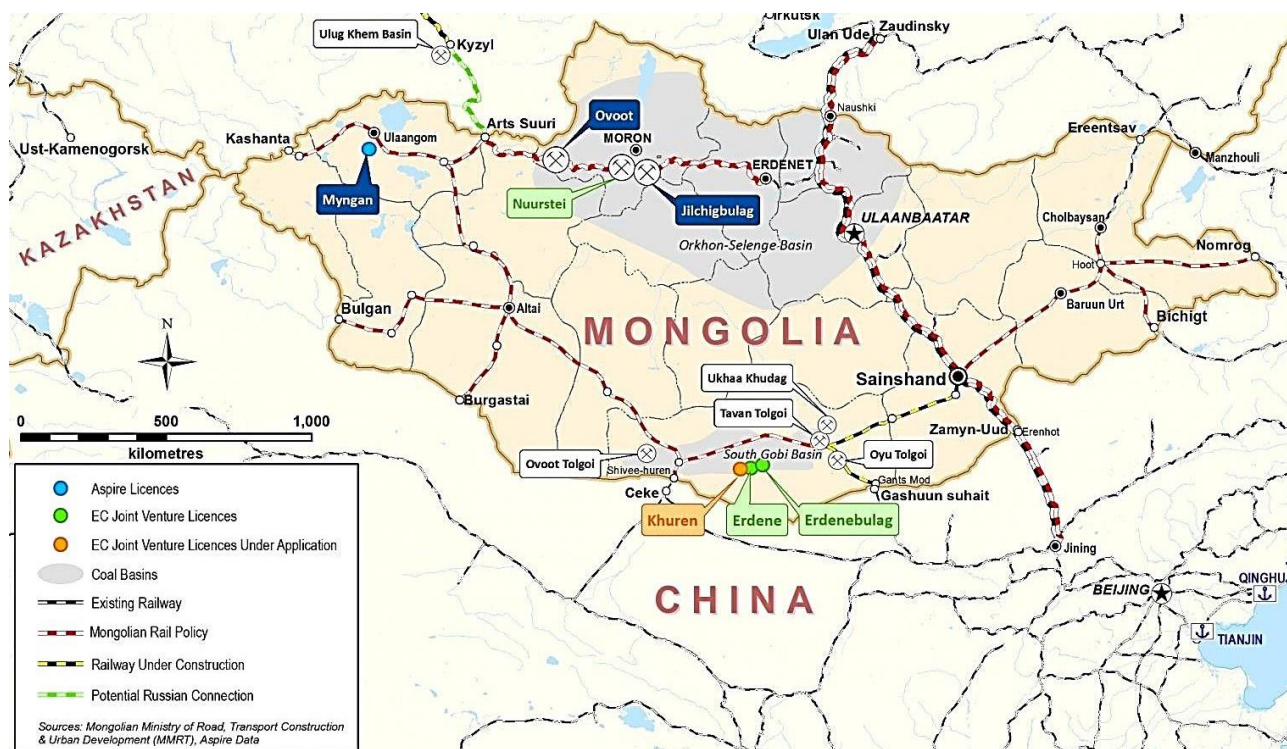


Рис. 2. Маршруты монгольских железных дорог в рамках развития экономического коридора Монголия–Россия–Китай до 2030 г.

Проблемная область управления и контроля за движением поездов на железных дорогах Монголии

Проблемная область	Содержание проблемы	Последствия
Сигнализационные системы	Использование устаревших технологий (SIRDP-E, CBI), ограниченный охват и функциональность	Повышенный риск сбоев, низкая эффективность управления движением
Инфраструктура станций и устройств	Изношенность, обновление проводится медленно и фрагментарно	Снижение надёжности, рост эксплуатационных расходов
Системы мониторинга	Недостаточное внедрение RFID, CCTV, Balise, счётчиков осей	Ограниченные возможности контроля в режиме реального времени
Организационная структура	Функции регулирования раздроблены между операторами, нет централизованного управления	Дублирование функций, снижение координации
Пропускная способность	Ограниченные линии, непрозрачное распределение слотов и расписаний	Препятствие развитию конкуренции и рост задержек
Кадровый потенциал	Недостаток квалифицированных специалистов и учебной базы	Задержка в развитии современных центров диспетчеризации (СТС)

Это позволит повысить безопасность и эффективность перевозок, снизить эксплуатационные издержки и укрепить позиции Монголии в международной транспортно-логистической системе.

Современные концепции управления движением

Развитие интегрированных систем управления железнодорожным транспортом опирается на принципы системного подхода и кибернетики, согласно которым транспортная сеть рассматривается как сложная социально-техническая система. Она объединяет инфраструктурные элементы (железнодорожные пути и станции, локомотивные и вагонные депо), подвижной состав, информационно-управляющие комплексы и человеческий фактор в единое целое [12, 16, 17].

Основными положениями системного подхода к управлению железнодорожным транспортом являются:

- целостность: железнодорожная сеть рассматривается как единый организм, где сбой одного элемента отражается на всей системе;
- иерархичность: управление строится по уровням: центральный диспетчерский центр (RTCC) → региональные диспетчерские узлы → локальные системы на железнодорожных станциях;
- интеграция: объединение различных подсистем (сигнализация, связь, мониторинг подвижного состава, логистика грузов) в единую информационную платформу [16–18].

Современные концепции управления движением базируются:

- на теории массового обслуживания, применяющейся для расчёта пропускной способности железнодорожных станций и перегонов;
- транспортной логистике, позволяющей оптимизировать потоки грузов на основе моделей распределения (например, модель гравитационного типа или модели линейного программирования);
- кибернетике – системе обратной связи, когда данные о движении поездов автоматически поступают в центр управления, где формируются корректирующие воздействия.

В качестве международных стандартов интеграции управления движением поездов можно выделить:

- ETCS (European Train Control System) – единый стандарт сигнализации и управления движением поездов в Европе, позволяющей интегрировать поезда разных стран в единую систему безопасности;
- GSM-R и LTE-R – цифровые системы связи, обеспечивающие постоянный обмен данными между поездом и центром управления;
- CBTC (Communication Based Train Control) – технологию, используемую в метрополитенах и скоростных линиях, основанную на непрерывной радиосвязи [6, 8, 18, 19].

В странах Европейского союза активно внедряется ERTMS (European Rail Traffic Management System) – единый стандарт управления движением. В Германии компания Deutsche Bahn реализует проекты по созданию цифровых диспетчерских центров (Digitale Stellwerke), объединяющих функции сигнализации, диспетчеризации и контроля в режиме реального времени. Данная технология позволяет обеспечить:

- прозрачное распределение подвижного состава и возможностей использования инфраструктурного комплекса железных дорог между перевозчиками;
- синхронизацию системы международных перевозок;
- минимизацию влияния человеческого фактора;
- повышение уровня безопасности перевозочного процесса [6, 18].

В Соединённых Штатах, несмотря на наличие десятков частных операторов, государством был введён обязательный стандарт Positive Train Control (PTC). Данная система предотвращает вероятность превышения скорости движения поездов, исключает или минимизирует вероятность возникновения случаев столкновений и сходов подвижного состава с рельсов, а также интегрирует данные всех транспортных компаний в единый протокол управления движением. В результате удалось значительно снизить количество аварийных ситуаций и повысить эффективность использования инфраструктурного комплекса железных дорог [6, 7, 16].

В Казахстане компания «Казакстан Темир Жолы» (KTZ) создала Единый диспетчерский центр (Unified Dispatching Center), что позволило сократить задержки поездов на 25 %, ускорить транзитные контейнерные перевозки на 2–3 дня, обеспечить интеграцию с системами России и Китая в рамках международных транспортных коридоров [6, 7, 16].

Китайские железные дороги (China Railway) управляются через сеть Национальных центров управления движением поездов (National Train Control Centers), использующих элементы искусственного интеллекта и Big Data. Данные центры позволяют в реальном времени регулировать движение как высокоскоростных, так и грузовых поездов, в результате чего Китай в кратчайшие сроки достиг высокой плотности движения при минимальном уровне аварийности, что стало эталоном работы железнодорожного транспорта для многих стран [6, 7, 16].

В Российской Федерации управление железнодорожным движением централизовано в рамках АО «РЖД». С 2000-х гг. компания последовательно развивает систему Единых диспетчерских центров управления (ЕДЦУ), которые объединяют региональные диспетчерские пункты и обеспечивают:

- оперативное управление движением поездов на ключевых полигонах Транссиба и БАМа;
- использование современных систем связи и автоматизированных комплексов (АСУ «Экспресс-3», ЕК АСУТ);
- интеграцию с цифровыми технологиями прогнозирования (цифровые двойники инфраструктуры).

Кроме того, Россия активно внедряет технологию Централизованного диспетчерского управления (ЦДУ), где за одним диспетчером закрепляется участок протяженностью до 400–600 км. Это позволяет сократить численность обслуживающего персонала, снизить вероятность ошибок и повысить пропускную способность магистралей [6–10].

Проведенный анализ международного опыта интеграции управления движением поездов показывает, что создание Единого центра управления движением поездов является ключевым условием успешного управления и организации эффективно перевозочного процесса в настоящее время, позволяющим:

- повысить уровень безопасности и надёжности перевозок;
- эффективно и бесперебойно использовать инфраструктурный комплекс;
- снизить эксплуатационные затраты на реализацию заданных объемов работы;
- интегрировать национальные системы в международные транспортные коридоры.

Таким образом, в особых условиях функционирования железных дорог Монголии, где сеть отличается значительной протяженностью, наличием однопутных линий и высокой зависимостью от объема

транзитного грузопотока, внедрение подобного центра позволит не только модернизировать систему управления движением, но и укрепит позиции страны как стратегического звена в экономическом коридоре «Россия–Монголия–Китай».

Перспективы внедрения ETCS Level 3 на железных дорогах Монголии

Железные дороги Монголии, опираясь на современные мировые технологические тенденции, проводят технико-экономическое обоснование проектного решения по внедрению ETCS Level 3. Однако, учитывая текущее состояние инфраструктурного комплекса, целесообразно реализовывать данный проект поэтапно. В настоящее время железные дороги Монголии используют систему SIRDPE, включающую существующее релейное и электронное оборудование, а также блок-участки (SOL-3 база). В связи с этим возникает необходимость модернизации системы сигнализации SIRDPE.

В долгосрочной перспективе, принимая во внимание мировые тенденции в развитии железнодорожных технологий, а также опыт сопредельных государств, развитие ETCS Level 3 является эффективным направлением. Тем не менее, исходя из современных потребностей в перевозках и запросов пользователей, а также учитывая среднее расстояние между железнодорожными станциями (около 30–40 км), можно заключить, что необходимость размещения большого количества дополнительных объектов между станциями в настоящий момент невелика. Поэтому, с точки зрения дальнейшего использования ETCS Level 3, необходимо предусмотреть установку счётчиков осей (Balise) между станциями с учётом не только расстояния, но и технических характеристик действующей системы электроснабжения. Кроме того, с целью обеспечения безопасности движения и в связи с ростом транспортного спроса на отдельных участках целесообразно устанавливать блок-участки на расстоянии 10 км [6, 8, 19].

Таким образом, на данном этапе рекомендуется монтаж устройств счёта осей и сигнализации с интервалом 10 км, включая установку как стационарных, так и переменных счётчиков осей (Balise). В дальнейшем, при переходе на ETCS Level 3, можно будет ограничиться только установкой счётчиков осей между железнодорожными станциями, дополнительно оснащая соответствующие позиции звуковой сигнализацией. Мировой опыт также подтверждает актуальность реализации указанного направления. Так, при сравнении материалов 2007 и 2016 гг. по внедрению ETCS видно, что проекты, ориентированные на ETCS Level 2, получили значительное развитие по сравнению с Level 1. Несмотря на то, что системы Level 1 по-прежнему широко используются, именно Level 2 рассматривается как более надёжное и перспективное техническое решение.

Основные преимущества ETCS Level 2 заключаются в следующем:

- непрерывной передаче данных между поездом и центром управления, обеспечивающей более высокий уровень безопасности;
- упрощении оборудования благодаря отказу от традиционных сигнальных систем на перегонах;
- снижении эксплуатационных затрат и повышении качества обслуживания;
- росте эффективности использования железнодорожной инфраструктуры.

В долгосрочной перспективе особое внимание необходимо уделить тому, что в Монголии планируется строительство более 7 800 км новых железнодорожных линий. Данные проекты должны изначально разрабатываться с учётом требований интегрированной системы управления и последующего внедрения ETCS Level 2-3. Такой подход позволит в дальнейшем избежать дополнительных расходов на модернизацию, обеспечит единую архитектуру сигнализации и связи, а также упростит интеграцию национальной сети в международные транспортные коридоры [6, 8, 12].

Таким образом, мировой опыт ясно показывает, что в долгосрочной перспективе страны стремятся к переходу от ETCS Level 1 к более совершенной системе ETCS Level 2. Для Монголии данная тенденция является стратегически важной, так как она позволяет интегрировать национальную железнодорожную сеть в международные транспортно-логистические коридоры на базе единых цифровых стандартов. В табл. 2 представлены этапы и направления реализации проектного решения [20–22].

Таблица 2

Этапы и направления реализации проектного решения

Этап реализации	Направление реализации	Протяжённость, км
I	Даланзадгад–Тавантолгой–Цагаан-Суварга–Зуун-Баян	Всего 1 040, в том числе 400
	Сайншанд–Баруун-Урт	350
	Баруун-Урт–Хоот	140
	Хоот–Чойбалсан	150
II	Эрдэнэт–Арц-Суурь	Всего 3162, в том числе 380
	Арц-Суурь–Нарийн-Сухайт–Шивээхурэн	1255
	Тавантолгой–Гашуун-Сухайт	267
	Хөот–Тамсагбулаг–Нөмрөг	380
	Хөот–Бичигт	200
	Зуун-Баян–Ханги	280
III	Улан-Батор–Хархорин	330

В исследовании поэтапного строительства национальной железнодорожной сети предусмотрено использование электрических цепных устройств и осевых датчиков для установки блок-участков между станциями, а также монтаж LEU и счётчиков осей (Balise) на межстанционных перегонах. На первоначальном этапе планируется именно такая схема, а в дальнейшем, при внедрении ETCS Level 3, целесообразно использовать только счётчики осей (Balise).

Выводы

Анализ современного состояния и международного опыта показал, что для Монголии ключевым направлением модернизации железнодорожного транспорта является создание Единого центра управления движением поездов (ЕЦУД) в сочетании с поэтапным внедрением цифровых технологий сигнализации и связи.

Доказана необходимость перехода к интегрированной системе управления безопасностью, которая обусловлена следующими факторами:

- ростом объёмов грузовых и транзитных перевозок;
- повышением требований к безопасности на международных маршрутах;
- стремлением Монголии интегрироваться в систему Евразийских транспортных коридоров;
- необходимостью стандартизации и цифровизации технологических процессов.

Проведенный анализ показал, что внедрение интегрированных систем позволит: повысить безопасность и надёжность перевозок; оптимизировать использование ограниченной пропускной способности; укрепить конкурентоспособность экспорта угля, меди и железной руды; интегрировать национальную сеть в международные транспортно-логистические коридоры.

Для реализации поставленных целей Монголии необходимо: утвердить правовую базу цифрового управления движением; построить техническую архитектуру на основе ETCS, Balise, RFID и национальной шины данных; сформировать организационную модель управления: ЕЦУД в Улан-Баторе + региональные пункты; реализовать государственно-частное партнёрство для финансирования проектов; развивать кадровый потенциал через обучение и международное сотрудничество.

Таким образом, доказано, что создание ЕЦУД и развитие интегрированных систем управления движением поездов являются не только технологической модернизацией, но и стратегическим шагом для обеспечения устойчивого экономического роста и интеграции Монголии в мировую транспортно-логистическую систему.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. О стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 17.06.2008 г. № 877-р. URL: <http://government.ru/docs/all/64817/> (дата обращения: 11.09.2025).
2. В Монголии утверждена «новая политика возрождения для стимулирования экономики» // News. URL : <https://news.myseldon.com/ru/news/index/264902086> (дата обращения: 11.09.2025).
3. Сценарии развития Восточной Сибири и российского Дальнего Востока в контексте политической и экономической динамики Азиатско-Тихоокеанского региона до 2030 года : аналитический доклад / научный руководитель А.А. Кокошин. URL : <http://econom.nsc.ru/ieie/Izdan/trudi/korjubaev/doklad.pdf> (дата обращения: 11.09.2025).
4. Национальное статистическое управление Монголии. URL : <http://www.en.nso.mn> (дата обращения: 11.09.2025).
5. Архит Б., Оленевич В.А. Перспективы развития инфраструктурного комплекса Монголии с учетом прироста грузопотока // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 4(84). С. 67–78.
6. Улан-Баторская железная дорога : офиц. сайт / Улаанбаатар тумур зам. URL : <http://www.ubtz.mn/> (дата обращения: 28.09.2025).
7. Российские железные дороги : офиц. сайт. URL : <http://www.rzd.ru> (дата обращения: 28.09.2025).
8. Политика долгосрочного развития Монголии «Видение – 2050» // Монголия сейчас. URL : <http://www.mongolnow.com/politika-dolgosrochnogo-razvitiya-mongolii-videnie-2050/> (дата обращения: 11.09.2025).
9. ГК 1520 и «Монгольские Железные Дороги» будут развивать железнодорожную инфраструктуру Монголии // Comnews.ru. URL : <https://www.comnews.ru/content/230028/2023-11-08/2023-w45/1011/gk-1520-i-mongolskie-zheleznye-dorogi-budut-razvivat-zheleznodorozhnyu-infrastrukturu-mongolii> (дата обращения: 25.09.2025).
10. Оленевич В.А., Архит Б. Рост транзитного грузопотока как ключевой фактор развития железных дорог Монголии // Экономика железных дорог. 2025. № 7. С. 85–97.
11. Оленевич В.А., Архит Б., Новикова Н.А. Аспекты реализации проекта экономического коридора «Россия–Монголия–Китай» // Финансовые аспекты структурных преобразований экономики. 2024. № 10. С. 72–82.
12. Архит Б., Оленевич В.А. Проблемы инфраструктурного комплекса железных дорог Монголии // Управление эксплуатационной работой на транспорте (УЭРТ-2024) : сборник трудов II Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 15–16 октября 2024 г. Санкт-Петербург : Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2024. С. 12–14.
13. Буровцев В.В. Парыгина Д.В. Мультимодальный транспортный узел как драйвер развития региональной экономики // Научные труды Вольного экономического общества России. 2025. Т. 251, № 1. С. 462–472. doi:10.38197/2072-2060-2025-251-1-462-472
14. Премьер-министр Монголии представил программу развития страны // Красная Весна. URL : <https://rossaprimavera.ru/news/230fd96a> (дата обращения: 11.09.2025).
15. Сценарии развития Восточной Сибири и российского Дальнего Востока в контексте политической и экономической динамики Азиатско-Тихоокеанского региона до 2030 года : аналитический доклад / Л.А. Аносова, А.Г. Коржубаев, А.Н. Панов [и др.]. Москва : Едиториал УРСС, 2011. 120 с.
16. Адаптация мировых трендов к российским реалиям цифровой трансформации управления цепями поставок / В.В. Буровцев, С.Н. Третьяк, Т.Ю. Зенкова, О.А. Лукашова // Цифровая трансформация региональной экономики: государственное управление и бизнес на Дальнем Востоке : материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Хабаровск, 29–30 ноября 2024 г. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2024. С. 42–47.
17. Агрегированный критерий оценки эффективности функционирования участков Улан-Баторской железной дороги / С.И. Носков, М.П. Базилевский, Ю.А. Трофимов, Б. Архит // Южно-Сибирский научный вестник. 2021. № 5(39). С. 159–164.
18. Монгольским дорогам пишут сценарий // Гудок. URL : <https://gudok.ru/1520/newspaper/detail.php?ID=1386223&ysclid=mgсbeур7ph455005926> (дата обращения: 29.09.2025).
19. Попытка анализа железнодорожных проектов Монголии в текущем году // Монголия Сейчас. URL : <http://www.mongolnow.com/popytka-analiza-zheleznodorozhnyh-proektov-mongolii-v-tekushhem-godu/?ysclid=mgс6fv107с660983656> (дата: обращения: 29.09.2025).
20. European Union Agency for Railways. ERTMS/ETCS System Overview. Brussels, 2022.
21. Korea Railroad Research Institute. LTE-R Based Railway Communication Systems. Seoul, 2020.
22. China Railway. Digital Control and Beidou Applications in Railway Transport. Beijing, 2022.

REFERENCES

1. O strategii razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossijskoj Federatsii do 2030 goda : rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federatsii ot 17.06.2008 g. № 877-r. [On the Strategy for the Development of Railway Transport in the Russian Federation until 2030: Order of the Government of the Russian Federation № 877-r dated June 17, 2008]. URL : <http://government.ru/docs/all/64817/> (data obrashcheniya: 11.09.2025).
2. V Mongolii utverzdena «novaya politika vozrozhdeniya dlya stimulirovaniya ekonomiki» [Mongolia adopts a «New Revitalization Policy to Stimulate the Economy»] // News. URL : <https://news.myseldon.com/ru/news/index/264902086> (data obrashcheniya: 11.09.2025).
3. Stsenarii razvitiya Vostochnoj Sibiri i rossijskogo Dal'nego Vostoka v kontekste politicheskoi i ekonomicheskoi dinamiki Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona do 2030 goda : [Scenarios for the development of Eastern Siberia and the Russian Far East in the context of the political and economic dynamics of the Asia-Pacific Region until 2030] analiticheskij doklad / nauchnyj rukovoditel' A.A. Kokoshin. URL: <http://econom.nsc.ru/ieie/Izdan/trudi/korjubaev/doklad.pdf> (data obrashcheniya: 11.09.2025).

4. Natsional'noe statisticheskoe upravlenie Mongolii [National Statistical Office of Mongolia]. URL : <http://www.en.nso.mn> (data obrashcheniya: 11.09.2025).
5. Arkhit B., Olentsevich V.A. Perspektivy razvitiya infrastruktornogo kompleksa Mongolii s uchetoм prirosta gruzopotoka [Prospects for the development of Mongolia's infrastructure complex, taking into account the increase in freight flow] // *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie*. 2024. № 4(84). S. 67–78.
6. Ofitsial'nyy sait Ulan-Batorskoj zheleznoj dorogi [Official website of the Ulaanbaatar Railway] / Ulaanbaatar Tumur Zam. URL : <http://www.ubtz.mn/> (data obrashcheniya: 28.09.2025).
7. Rossijskie zheleznye dorogi: ofitsial'nyy sait [Russian Railways: official website]. URL : <http://www.rzd.ru> (data obrashcheniya: 28.09.2025).
8. Politika dolgosrochnogo razvitiya Mongolii: «Videnie–2050» [Mongolia's long-term development policy: «Vision 2050»] // *Mongolia sejchas*. URL : <http://www.mongolnow.com/politika-dolgosrochnogo-razvitiya-mongolii-videnie-2050/> (data obrashcheniya: 11.09.2025).
9. GK 1520 i «Mongol'skie Zheleznye Dorogi» budut razvivat' zheleznodorozhnyuyu infrastrukturu Mongolii [GK 1520 and Mongolian Railways will develop Mongolia's railway infrastructure] // *Comnews.ru*. URL : <https://www.comnews.ru/content/230028/2023-11-08/2023-w45/1011/gk-1520-i-mongolskie-zheleznye-dorogi-budut-razvivat-zheleznodorozhnyuyu-infrastrukturu-mongolii> (data obrashcheniya: 25.09.2025).
10. Olentsevich V.A., Arkhit B. Rost tranzitnogo gruzopotoka kak klyuchevoj faktor razvitiya zheleznykh dorog Mongolii [Growth of transit cargo traffic as a key factor in the development of Mongolia's railways] / V. A. Olentsevich, B. // *Ekonomika zheleznykh dorog*. 2025. № 7. S. 85–97.
11. Olentsevich V.A., Arkhit B., Novikova N.A. Aspekty realizatsii proekta ekonomicheskogo koridora «Rossiya – Mongoliya – Kitaj» [Aspects of the implementation of the project of the economic corridor «Russia – Mongolia – China»] // *Finansovye aspekty strukturnykh preobrazovanij ekonomiki*. 2024. № 10. S. 72–82.
12. Arkhit B., Olentsevich V.A. Problemy infrastruktornogo kompleksa zheleznykh dorog Mongolii [Problems of the infrastructure complex of Mongolia's railways] // *Upravlenie ekspluatatsionnoj rabotoj na transporte (UERT-2024) : sbornik trudov II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 15-16 oktyabrya 2024 g. Sankt-Peterburg : Peterburgskij gosudarstvennyy universitet putej soobsheniya Imperatora Aleksandra I*, 2024. S. 12–14.
13. Burovtsev V.V., Parygina D.V. Mul'timodal'nyy transportnyy uzel kak draiver razvitiya regional'noj ekonomiki [Multimodal transport hub as a driver of regional economic development] // *Nauchnye trudy Vol'nogo ekonomicheskogo obshchestva Rossii*. 2025. T. 251, № 1. S. 462–472. doi:10.38197/2072-2060-2025-251-1-462-472
14. Prem'er-ministr Mongolii predstavil programmu razvitiya strany [The Prime Minister of Mongolia presented the country's development program] // *Krasnaya Vesna*. URL : <https://rossaprimavera.ru/news/230fd96a> (data obrashcheniya: 11.09.2025).
15. Stsenarii razvitiya Vostochnoj Sibiri i rossijskogo Dal'nego Vostoka v kontekste politicheskoy i ekonomicheskoy dinamiki Aziatsko-Tikhoookanskogo regiona do 2030 goda [Scenarios for the development of Eastern Siberia and the Russian Far East in the context of the political and economic dynamics of the Asia-Pacific Region until 2030] : analiticheskij doklad / L.A. Anosova, A.G. Korzhubaev, A.N. Panov [et al.]. Moskva : Editorial URSS, 2011. 120 s.
16. Adaptatsiya mirovykh trendov k rossijskim realiyam tsifrovoy transformatsii upravleniya tsepyami postavok [Adaptation of global trends to the Russian realities of digital transformation of supply chain management] / V.V. Burovtsov, S.N. Tretyak, T.Yu. Zenkova, O.A. Lukashova // *Tsifrovaya transformatsiya regional'noj ekonomiki : gosudarstvennoe upravlenie i biznes na Dal'nem Vostoke : materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, Khabarovsk, 29–30 noyabrya 2024 g. Khabarovsk : Izd-vo DGUPS*, 2024. S. 42–47.
17. Agregirovanny kriterij otsenki effektivnosti funktsionirovaniya uchastkov Ulan-Batorskoj zheleznoj dorogi [Aggregated criterion for assessing the effectiveness of the Ulaanbaatar railway sections] / S.I. Noskov, M.P. Bazilevsky, Yu.A. Trofimov, B. Arkhit // *Yuzhno-Sibirskij nauchnyy vestnik*. 2021. № 5 (39). S. 159–164.
18. Mongol'skim dorogam pishut stsenarij [Mongolian roads get a script] // *Gudok*. URL : <https://gudok.ru/1520/newspaper/detail.php?ID=1386223&ysclid=mgc6eyp7ph455005926> (data obrashcheniya: 29.09.2025).
19. Popytka analiza zheleznodorozhnykh proektov Mongolii v tekushchem godu [An attempt to analyze Mongolia's railway projects in the current year] // *Mongolia sejchas*. URL : <http://www.mongolnow.com/popytka-analiza-zheleznodorozhnykh-proektov-mongolii-v-tekushhem-godu/?ysclid=mgc6fv107c660983656> (data obrashcheniya: 29.09.2025).
20. European Union Agency for Railways. ERTMS/ETCS System Overview. Brussels, 2022.
21. Korea Railroad Research Institute. LTE-R Based Railway Communication Systems. Seoul, 2020.
22. China Railway. Digital Control and Beidou Applications in Railway Transport. Beijing, 2022.

Информация об авторах

Б. Архит – аспирант кафедры «Управление эксплуатационной работой»;
В.А. Оленцевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой».

Information about the authors

B. Arkhit – Post-graduate Student, Department of Operational Work Management;
V.A. Olentsevich – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Operational Work Management.

Статья поступила в редакцию 03.10.2025; одобрена после рецензирования 12.11.2025; принята к публикации 12.11.2025.
The article was submitted: 03.10.2025; approved after reviewing: 12.11.2025; accepted for publication: 12.11.2025.

Научная статья
УДК 625.855
doi:10.31079/2415-8658-2025-4-14-24

УГЛЕРОДНЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ДОРОЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА: МОДИФИКАЦИЯ БИТУМНЫХ ВЯЖУЩИХ И АСФАЛЬТОБЕТОНОВ

Афанасенко Алексей Александрович¹, Яцевич Павел Петрович²

^{1,2} Белорусский национальный технический университет, филиал БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт», Центр научных исследований и испытаний дорожно-строительных и гидроизоляционных материалов, Минск, Республика Беларусь

Автор, ответственный за переписку: Афанасенко Алексей Александрович, cniidsgm@bntu.by

Аннотация. Настоящая статья посвящена систематизации и критическому анализу данных в области применения углеродных наноматериалов (УНМ) для модификации битумных вяжущих и асфальтобетонов. Рассмотрены основные типы УНМ, проанализированы ключевые подходы к диспергированию наночастиц в битумной матрице. В качестве практической иллюстрации представлены результаты собственных исследований, демонстрирующие высокую эффективность двух различных методов модификации. Установлено, что комплексная модификация битума полимером SBS и УНМ позволяет повысить температуру размягчения с 48,2 до 76,5 °С, что составляет прирост почти на 60 %, а введение УНМ на минеральном носителе в состав асфальтобетона обеспечивает практически двукратное увеличение предела прочности при сжатии при 50 °С. В заключение определены нерешенные вопросы и намечены перспективные направления для будущих исследований, подчеркивающие необходимость разработки многофункциональных дорожных покрытий.

Ключевые слова: углеродные наноматериалы, модификация битума, асфальтобетон, дорожное строительство, углеродные нанотрубки, полимерно-битумные вяжущие, механические свойства, теплостойкость, диспергирование наночастиц, механоактивация

Original article

CARBON NANOMATERIALS FOR ROAD CONSTRUCTION: MODIFICATION OF BITUMINOUS BINDERS AND ASPHALT CONCRETES

Afanasenko Alexey A.¹, Yatsevich Pavel P.²

^{1,2} Belarusian National Technical University, Branch of BNTU «Scientific and Research Polytechnic Institute», Center for Scientific Research and Testing for Road Construction Materials, Minsk, Republic Belarus
Corresponding author: Afanasenka Aliaksei Alexandrovich, cniidsgm@bntu.by

Abstract. This article is devoted to the systematization and critical analysis of data concerning the use of carbon nanomaterials (CNMs) for the modification of bituminous binders and asphalt concretes. The study reviews the main types of CNMs and analyzes key approaches to the dispersion of nanoparticles within the bituminous matrix. As a practical illustration, the paper presents the results of the authors' own research, demonstrating the high efficiency of two distinct modification methods. It was found that the combined modification of bitumen with SBS polymer and CNMs increases the softening point from 48,2 to 76,5 °C, representing an improvement of nearly 60 %. Additionally, the incorporation of CNMs on a mineral carrier into asphalt concrete leads to an almost twofold increase in compressive strength at 50 °C. The conclusion identifies unresolved issues and outlines promising directions for future research, emphasizing the need to develop multifunctional road pavements.

Keywords: carbon nanomaterials, bitumen modification, asphalt concrete, road construction, carbon nanotubes, polymer-modified bitumen, mechanical properties, thermal resistance, nanoparticle dispersion, mechanoactivation

Введение

Усложнение условий эксплуатации дорожных покрытий, обусловленное ростом интенсивности транспортных потоков, увеличением осевых нагрузок и ужесточением климатических факторов, ставит перед дорожной отраслью задачу кардинального повышения долговечности и надежности асфальтобетонов. Преждевременное разрушение дорожных конструкций, проявляющееся в виде колеобразования, усталостного и температурного тре-

щинообразования, наносит существенный экономический ущерб и напрямую влияет на безопасность дорожного движения. В связи с этим разработка и внедрение инновационных материалов, способных обеспечить сохранение высоких транспортно-эксплуатационных показателей на протяжении всего расчетного срока службы, является одной из наиболее актуальных проблем современного дорожного строительства.

Традиционным путем улучшения свойств асфальтобетона является модификация органического вяжущего, в частности, применение полимеров для получения полимерно-битумных вяжущих (ПБВ). Несмотря на доказанную эффективность данного подхода, его широкое применение сопряжено с рядом технологических и экономических ограничений, что стимулирует поиск принципиально новых модификаторов, способных обеспечить скачок в качестве дорожно-строительных материалов.

Принципиально новый этап в развитии материаловедения связан с использованием нанотехнологий. Появление углеродных наноматериалов, таких как фуллерены, углеродные нанотрубки (УНТ) и графен, открыло уникальные возможности для создания композитов с ранее недостижимыми свойствами. Уникальное сочетание высочайшей прочности, упругости и развитой удельной поверхности позволяет рассматривать УНМ в качестве идеальных кандидатов для создания наноразмерного армирующего каркаса в структуре асфальтобетона, способного эффективно противостоять внешним нагрузкам и предотвращать развитие микроразрушений.

Однако практическая реализация потенциала УНМ в вязких органических матрицах, к которым относится битум, сталкивается с фундаментальной проблемой. Высокая удельная поверхностная энергия наночастиц обуславливает их выраженную склонность к агломерации, т.е. самопроизвольному образованию крупных и устойчивых скоплений. Неравномерное распределение агломератов в объеме вяжущего не только не приводит к улучшению свойств композита, но может вызывать появление концентраторов напряжений и, как следствие, оказывать негативный эффект. Таким образом, ключевой научной и технологической задачей становится разработка эффективных методов деагломерации и равномерного диспергирования УНМ в структуре дорожных композитов.

Цель работы – систематизация и критический анализ существующих подходов к применению углеродных наноматериалов для модификации дорожных композитов, а также экспериментальная оценка эффективности двух принципиально различных методов введения УНМ для улучшения эксплуатационных свойств битумных вяжущих и асфальтобетонов.

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих задач.

1. Провести анализ научной литературы для определения основных типов УНМ, применяемых в дорожном строительстве, и выявления ключевой проблемы, препятствующей их эффективному использованию – диспергирования.

2. Исследовать влияние комплексной модификации полимерно-битумного вяжущего углеродными наноматериалами на его ключевые физико-

механические свойства, такие как температура размягчения и пенетрация.

3. Оценить эффективность метода введения УНМ в состав асфальтобетонной смеси на предварительно подготовленном минеральном носителе с использованием механоактивации и определить его влияние на прочностные характеристики и водостойкость асфальтобетона.

4. На основе полученных результатов провести сравнительный анализ исследованных подходов к модификации и определить перспективные направления для дальнейших разработок.

Краткий исторический очерк

Современный этап развития исследований в области углеродных наноматериалов берет свое начало с середины 80-х гг. прошлого столетия и характеризуется тремя ключевыми открытиями, определившими основные векторы развития данной научной дисциплины.

Первым фундаментальным прорывом стало открытие фуллеренов в 1985 г. группой ученых под руководством Х. Крото, Р. Смолли и Р. Керла [1]. В ходе эксперимента по лазерному испарению графита с последующим масс-спектрометрическим анализом продуктов конденсации паров углерода были обнаружены пики [2], соответствующие особо стабильным многоатомным кластерам C_{60} и C_{70} (рис. 1). Эти молекулярные соединения, принадлежащие к классу аллотропных форм углерода, представляют собой выпуклые замкнутые многогранники, составленные из трехкоординированных атомов углерода, которые образуют пяти- и шестиугольные грани. Молекулы получили название «фуллерены» в честь архитектора Р. Бакминстера Фуллера [3], использовавшего подобные геодезические купола в своих архитектурных проектах. Наиболее известным представителем данного класса является бакминстерфуллерен C_{60} , имеющий форму усеченного правильного икосаэдра [4]. Именно такая замкнутая каркасная структура обеспечивает фуллеренам высокую устойчивость к химическим, термическим и механическим воздействиям [5–9]. За данное открытие его авторы в 1996 г. были удостоены Нобелевской премии по химии.

Открытие послужило мощным стимулом для поиска и исследования других наноразмерных аллотропных форм углерода. Следующим важным этапом стало детальное исследование углеродных нанотрубок японским физиком Сумио Иидзимой в 1991 г. [10]. С помощью просвечивающей электронной микроскопии он описал геометрию и структуру полых цилиндрических образований, состоящих из одной или нескольких свернутых в трубку графеновых плоскостей. Несмотря на то, что УНТ наблюдались и ранее, именно вклад Иидзимы в понимание их природы и физических свойств признается основополагающим.

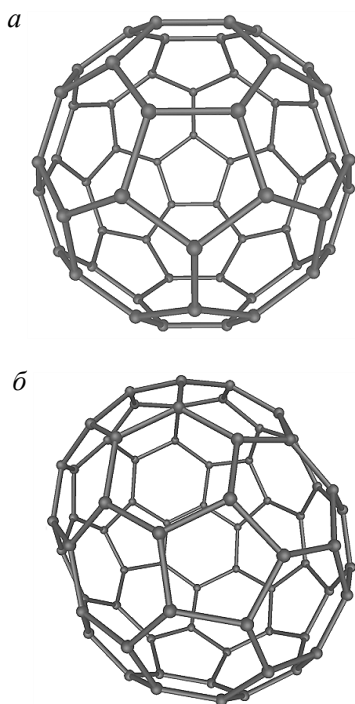


Рис. 1. Фуллерены: *a* – C₆₀; *б* – C₇₀

УНТ представляют собой аллотропную модификацию углерода в виде полых цилиндрических структур [11, 12]. В зависимости от числа графеновых слоев УНТ классифицируют на одностенные (рис. 2, *a*) и многостенные (рис. 2, *б*). Обе структуры имеют различные характеристики, которые делают эти нанотрубки подходящими для различных сфер использования [13]. Установлено, что в зависимости от геометрии, а именно от угла скручивания графеновой плоскости, УНТ могут проявлять свойства как полупроводников, так и металлов [14, 15]. Кроме того, они обладают рекордно высокими показателями механической прочности и жесткости среди всех известных искусственно синтезированных материалов [2, 13, 16, 17].

Логическим продолжением исследований УНТ стало выделение и изучение их структурной основы, графена [18, 19]. В 2004 г. в Манчестерском университете российские ученые А. Гейм и К. Новоселов применили метод механического отщепления слоев от высокоориентированного пиролитического графита, что позволило впервые получить образцы, состоящие всего из одного слоя атомов углерода [20]. За свои передовые исследования в 2010 г. Гейм и Новоселов были удостоены Нобелевской премии по физике.

За последнее десятилетие поиск недорогих технологий синтеза привел к значительному расширению номенклатуры графеноподобных структур: нанолиты расширенного графита; чешуйчатый графит; фторографен; нанографит; восстановленный оксид графена; графан; графеновые нанокомпозиты; графеновая нанолента; графеновые нанолиты; графеновые квантовые точки; графон и др. [21, 22].

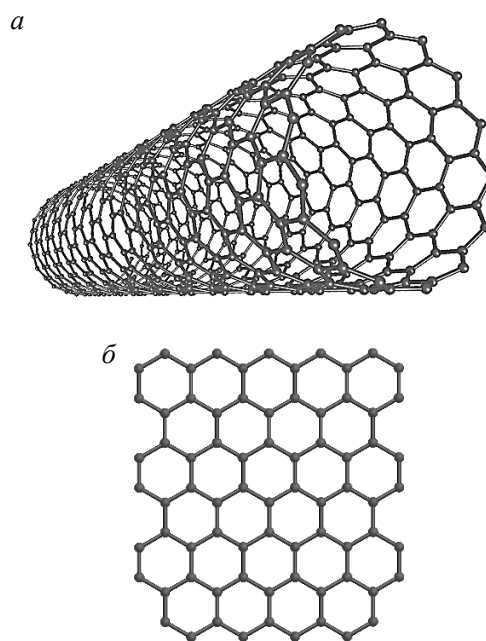


Рис. 2. Общий вид и структура УНТ:
a – одностенная; *б* – графен

Современные разработки позволили значительно снизить себестоимость углеродосодержащих материалов и обеспечили возможность их практического применения для модификации органических вяжущих и асфальтобетонных смесей.

Анализ применения УНМ в дорожно-строительных материалах

Несмотря на значительный теоретический потенциал, практическое применение углеродных наноматериалов в дорожном строительстве находится на начальном этапе развития. Основной барьер, препятствующий полной реализации их уникальных свойств, заключается в выраженной склонности наночастиц к агломерации в вязкой битумной матрице. Преодоление сил межмолекулярного притяжения и достижение равномерного, стабильного диспергирования УНМ является первоочередной научной и технологической задачей, от решения которой напрямую зависит эффективность их применения.

Из анализа научных публикаций [23–45] следует, что для введения УНМ в состав органического вяжущего и асфальтобетонных смесей сформировалось несколько ключевых подходов, которые можно условно разделить на методы физического воздействия и химической модификации.

К методам физического воздействия относят механическое смешение и ультразвуковую обработку. Механическое смешение предполагает введение УНМ в битум с использованием высокоскоростных сдвиговых смесителей, как правило, при повышенной температуре, свыше 140 °С, и интенсивности перемешивания более 1000 об/мин [23–29]. Ультра-

звуковая обработка является другим физическим методом, при котором мощные акустические волны создают в жидкости кавитационные пузырьки, их последующее схлопывание генерирует локальные микроудары, эффективно разрушающие агломераты наночастиц [26, 30].

Химический подход, или функционализация, представляет собой более сложный процесс целенаправленного изменения химического состава поверхности УНМ. Он включает предварительную очистку наноматериалов, например, кислотной обработкой, с последующим присоединением к их поверхности различных функциональных групп, таких как карбоксильные, гидроксильные и аминные. Цель функционализации – повышение химического сродства полярной поверхности УНМ с преимущественно неполярной битумной средой, что улучшает их диспергируемость и стабильность в объеме вяжущего [31].

Применяются и комбинированные подходы, использующие вспомогательные среды или носители: УНМ могут быть предварительно диспергированы в растворителе, например, в этиловом спирте или водном растворе поверхностно-активного вещества, с последующим введением полученной суспензии в битум. Альтернативно, УНМ вводятся в структуру вяжущего через материалы-носители, в качестве которых могут выступать полимеры или тонкодисперсные минеральные порошки.

Механизм положительного влияния УНМ на свойства дорожных материалов носит комплексный характер [32–40]. Успешное диспергирование наночастиц способствует формированию в объеме вяжущего пространственной армирующей сетки, что повышает его когезионную прочность, а также устойчивость к деформациям и усталостным разрушениям. Кроме того, высокая удельная поверхность УНМ обеспечивает улучшение адгезионного взаимодействия на границе битума и каменного материала, повышая стойкость асфальтобетона к воздействию ультрафиолетового излучения и агрессивных сред.

Анализ прикладных работ демонстрирует значительное улучшение ключевых механических характеристик асфальтобетонов. Так, в исследовании, проведенном в Мичиганском технологическом университете [41, 42], было установлено, что введение 2 % углеродных нанонитей в состав смеси позволило увеличить ее динамический модуль упругости в среднем на 30 % и снизить глубину колеи на 30–40 % по сравнению с контрольным составом. Аналогично, отмечается рост устойчивости по Маршаллу, которая может быть увеличена на 11,4 % при оптимальной концентрации УНТ около 0,5 % [23]. Подтверждением многофакторного влияния служат и результаты изучения нановосстановленного оксида графена [43]: его введение

в концентрациях от 0,2 до 0,6 % приводит к комплексному улучшению системы «вяжущее–заполнитель» за счет роста вязкости битума и его адгезии, что в итоге повышает стабильность смеси и ее водостойкость (индекс TSR). Эти улучшения объясняются высоким соотношением сторон наночастиц, их превосходной механической прочностью и модулем Юнга [23, 27], что способствует эффективной передаче напряжений и замедлению распространения микротрещин [26].

Особого внимания заслуживает способность УНТ повышать потенциал асфальтового вяжущего к самовосстановлению [44]. Установлено, что добавление 0,5 % УНТ может увеличивать среднеквадратичное смещение молекул в структуре вяжущего на 230–650 %, что является косвенным показателем интенсификации процессов залечивания микроповреждений. Этот эффект объясняется высокой теплопроводностью УНТ, которая способствует быстрому достижению термического равновесия и интенсифицирует молекулярную диффузию. Примечательно, что графеновые нанохлопья, в отличие от УНТ, не показали заметного влияния на самовосстановление, что связывают с их двумерной структурой, препятствующей диффузионным процессам [44].

Вместе с тем широкое внедрение УНТ сопряжено с рядом нерешенных проблем [23, 26, 27, 45]. Основной из них остается агломерация нанотрубок при высоких концентрациях, например, свыше 1,0 % по массе, обусловленная большими силами Ван-дер-Ваальса, что снижает эффективность армирования. Другой важный аспект – экономическая целесообразность, оценки варьируются от отсутствия прямой выгоды до возможного увеличения стоимости строительства на 5–10 %. Кроме того, существуют опасения, связанные с безопасностью производства и применения наноматериалов, что требует строгого соблюдения технологических протоколов. Решение этих комплексных задач является необходимым условием для перехода от лабораторных исследований к промышленному применению технологии.

Таким образом, анализ существующих научных публикаций однозначно свидетельствует о высоком потенциале УНМ как модификаторов дорожных композитов. Установлено, что их введение, при условии решения фундаментальной задачи диспергирования, позволяет целенаправленно улучшать ключевые эксплуатационные характеристики асфальтобетона, включая сдвигоустойчивость, трещиностойкость и водостойкость, а также придавать материалу новые функциональные свойства, такие как способность к самовосстановлению. Вместе с тем эффективность модификации в значительной степени определяется выбранным методом введения наночастиц.

Первичные исследования дорожно-строительных материалов

Для практической апробации подходов, рассмотренных в списке источников, был проведен комплекс лабораторных исследований. Важно отметить, что первоначальные эксперименты, основанные на прямом введении УНМ в битум и асфальтобетонную смесь, не привели к ожидаемому улучшению физико-механических показателей дорожно-строительных композитов. Отсутствие положительной динамики подтвердило фундаментальный тезис о том, что без решения проблемы агломерации потенциал УНМ не может быть реализован.

Полученные неудовлетворительные результаты послужили основанием для пересмотра стратегии исследований. С учетом анализа источников [23–45] было принято решение сосредоточиться на разработке методов, обеспечивающих предварительную активацию и деагломерацию наночастиц. В рамках данной работы апробированы два принципиально различных подхода: первый заключался в комплексной модификации непосредственно битумного вяжущего, а второй предусматривал модификацию асфальтобетонной смеси через введение УНМ на минеральном носителе.

В качестве УНМ в настоящем исследовании использовался продукт, синтезированный на научно-производственном предприятии «Передовые исследования и технологии» (г. Минск) под руководством академика НАН Беларуси, доктора физико-математических наук, профессора С.А. Жданка. Синтез осуществлялся по оригинальной технологии каталитического пиролиза углеводородного сырья в потоке низкотемпературной плазмы. Полученное вещество, обозначаемое как «депозит», представляет собой многокомпонентную смесь, включающую структурированные углеродные нанотрубки и нановолокна, аморфный углерод, графитоподобные наночастицы, а также остаточный металлический катализатор в количестве до 5%. Разработанный технологический процесс также включает производственные операции обработки после синтеза, в том числе ультразвуковое

фракционирование, позволяющее выделить материал с более однородным дисперсным и морфологическим составом (рис. 3).

На первом этапе исследований изучалась эффективность комплексной модификации битума, основанная на гипотезе о повышенном эффекте при совместном применении полимера и углеродных наноматериалов. Предполагалось, что УНМ способны не только самостоятельно армировать структуру битума, но и качественно улучшать пространственную сетку, формируемую полимером

В качестве объектов исследования выступили три типа вяжущего. Контрольным образцом служил базовый битум марки 70/100, соответствующий требованиям СТБ EN 12591. В качестве полимерно-битумного вяжущего (ПБВ) использовали состав на основе базового битума, модифицированного 2,5%-ным полимером типа стирол-бутадиен-стирол марки KTR 401 (производитель LG Chem Ltd., Южная Корея). Третьим объектом стало комплексно-модифицированное вяжущее, полученное путем введения в ПБВ углеродных наноматериалов при содержании УНМ в количестве 1% от массы полимера SBS.

Приготовление комплексно-модифицированного вяжущего осуществлялось в лабораторном высокоскоростном сдвиговом смесителе при интенсивности перемешивания 1200 об/мин в течение 40 мин для достижения полной гомогенизации системы. Для оценки свойств полученных вяжущих были определены их основные стандартизированные характеристики: температура размягчения по методу «Кольцо и Шар» (КиШ) согласно СТБ EN 1427; глубина проникания иглы при 25 °С (пенетрация) согласно СТБ EN 1426.

Результаты испытаний подтвердили высокую эффективность комплексной модификации, продемонстрировав эффект по улучшению ключевых эксплуатационных свойств по сравнению как с исходным битумом, так и с ПБВ (рис. 4).

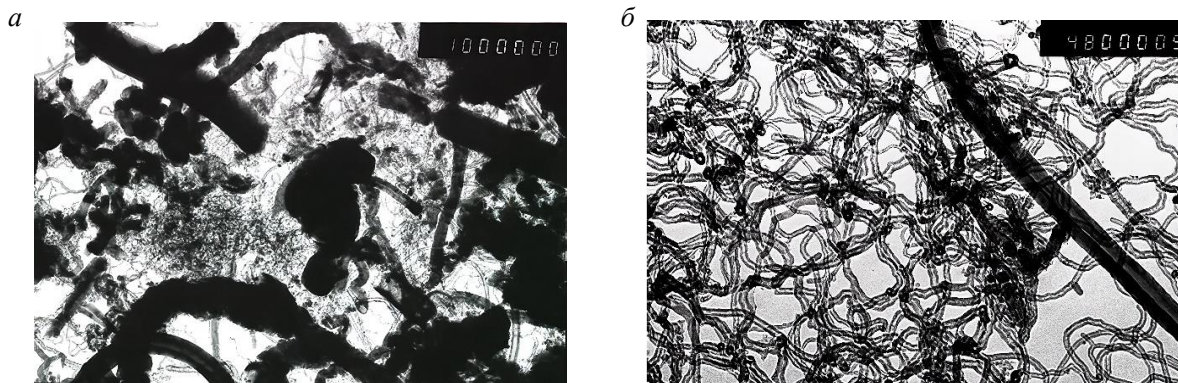


Рис. 3. Морфология синтезированных УНМ по данным просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ): а – исходный депозит; б – фракция после ультразвуковой обработки

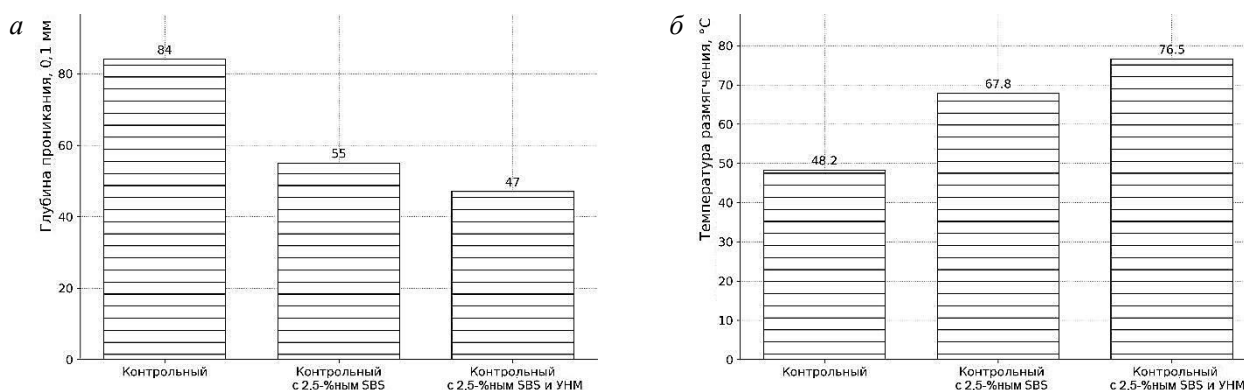


Рис. 4. Влияние модификаторов: *а* – глубина проникания иглы при 25 °С; *б* – температура размягчения

Наиболее существенные изменения зафиксированы для температуры размягчения по методу «Кольцо и Шар», которая является показателем теплостойкости вяжущего. Введение полимера SBS повысило этот показатель с 48,2 °С для контрольного образца до 67,8 °С. Последующее добавление УНМ в состав модификатора привело к дополнительному росту температуры размягчения до 76,5 °С, что указывает на кардинальное повышение теплостойкости и когезионной прочности вяжущего. Одновременно наблюдалось закономерное снижение глубины проникания иглы при 25 °С, характеризующее жесткость системы. Если для исходного битума этот показатель составлял 84 мм⁻¹, то для ПБВ он снизился до 55 мм⁻¹, а для комплексно-модифицированного вяжущего достиг значения 47 мм⁻¹. Это свидетельствует о формировании более жесткой и упругой структуры при стандартной температуре.

Хотя для полного описания физико-химических механизмов, лежащих в основе наблюдаемых явлений, требуются дальнейшие структурные исследования, на данном этапе можно выдвинуть обоснованную гипотезу. Предполагается, что наблюдаемый эффект объясняется тем, что углеродные наноматериалы, равномерно распределяясь в объеме пространственной полимерной сетки, формируемой макромолекулами SBS, выступают в качестве узлов физической сшивки. Они дополнительно армируют структуру, создавая более прочную и стабильную трехмерную нанополимерную сеть, которая эффективно ограничивает подвижность полимерных цепей при высоких температурах, что и проявляется в значительном росте температуры размягчения.

На втором этапе исследований был апробирован альтернативный подход, направленный на модификацию не вяжущего, а асфальтобетонного композита в целом. Метод основан на введении УНМ в состав смеси на предварительно подготовленном минеральном носителе.

В качестве объекта исследования была выбрана асфальтобетонная щебеночная мелкозернистая горячая плотная смесь типа С (щебеночно-мастичный асфальтобетон, SMA), с максимальной крупностью

заполнителя 10 мм, марки I с показателем сдвигоустойчивости 2,2 (ЩМС_г 20 – I/2,2), запроектированная в соответствии с требованиями СТБ 1033 (Республика Беларусь). Состав контрольной смеси включал следующие компоненты: гранитный щебень фракции 5–10 мм (72 %); песок из отсевов дробления гранитного щебня (17 %); неактивированный доломитовый минеральный порошок (11 %). В качестве стабилизирующей добавки использовались целлюлозные волокна GranoCell в количестве 0,3 % от массы минеральной части; в качестве вяжущего применялся битум марки 70/100 в количестве 5,8 % от массы минеральной части.

Ключевое отличие экспериментального состава от контрольного заключалось в полной замене минерального порошка на композиционный материал, полученный путем предварительной механоактивации УНМ. Данный процесс обеспечивался совместным помолом дозированных порций УНМ и кварцевого песка, что позволило не только равномерно распределить наночастицы по поверхности минерального носителя, но и произвести их деагломерацию и активацию за счет интенсивных механических воздействий.

Приготовление и уплотнение образцов асфальтобетона для последующих испытаний проводилось в строгом соответствии с классической технологией при контроле всех технологических параметров по СТБ 1115. Результаты испытаний уплотненных образцов продемонстрировали значительное улучшение ключевых физико-механических характеристик модифицированной смеси по сравнению с контрольной (рис. 5 и 6).

Наиболее показательным результатом является практически двукратное увеличение предела прочности при сжатии при температуре 50 °С, с 0,78 МПа для контрольного состава до 1,50 МПа для экспериментального (рис. 5, *а*). Это подтверждается и ростом силы сцепления при 50 °С, с 0,25 МПа до 0,41 МПа (рис. 5, *б*). Совокупность полученных данных свидетельствует о существенном повышении сопротивляемости асфальтобетона пластическим деформациям и его потенциальной стойкости к колееобразованию.

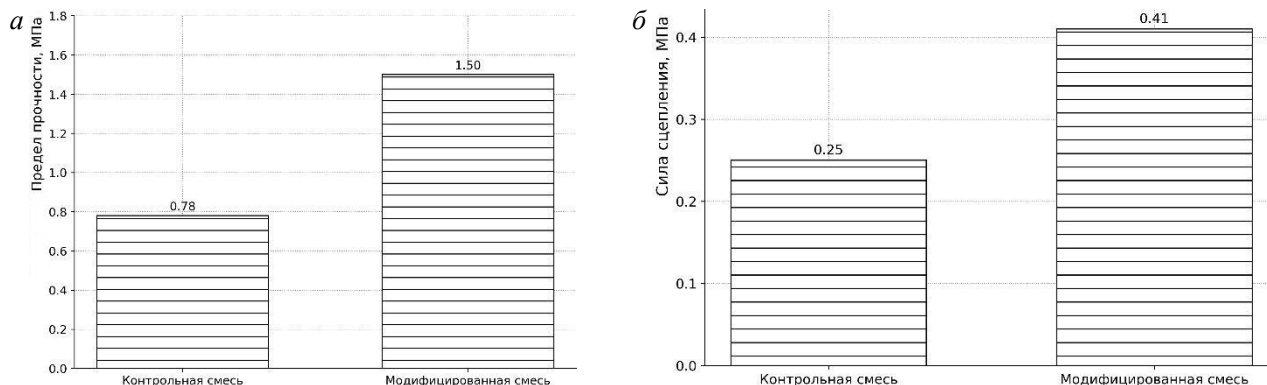


Рис. 5. Влияние модификации на характеристики асфальтобетона при 50 °С:
а – предел прочности при сжатии; б – сила внутреннего сцепления

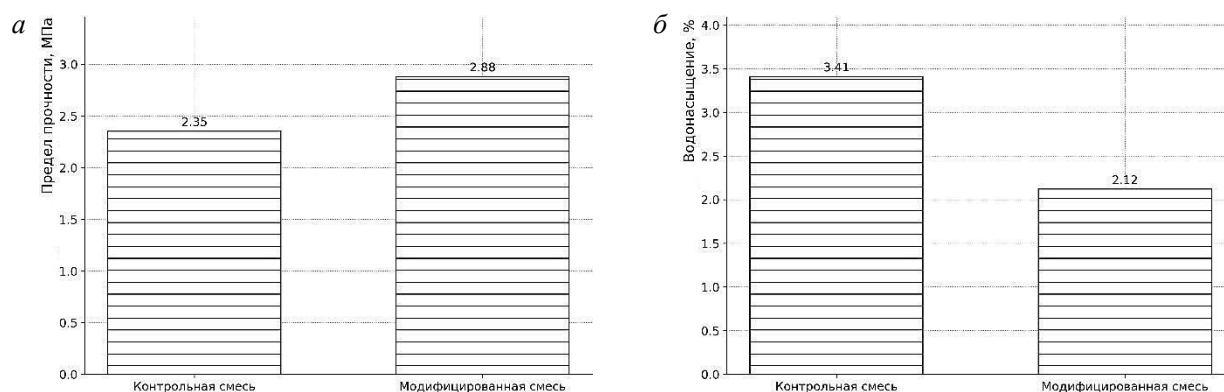


Рис. 6. Влияние модификации на характеристики асфальтобетона:
а – предел прочности при растяжении, при расколе, при 0 °С; б – водонасыщение

Испытания при 0 °С также показали положительную динамику: предел прочности при растяжении при расколе увеличился с 2,35 МПа до 2,88 МПа (методика СТБ 1115, скорость нагружения 3 мм/мин, рис. 6, а), что говорит о повышении трещиностойкости материала при низких температурах. Одновременно было зафиксировано заметное снижение показателя водонасыщения с 3,41 до 2,12 % (рис. 6, б), что указывает на формирование более плотной и менее пористой структуры, способствующей повышению долговечности и морозостойкости асфальтобетона.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о механизме влияния модификатора. Важно отметить, что столь значительное улучшение свойств было достигнуто при практически неизменной средней плотности образцов (2,44 г/см³ – для контроля и 2,45 г/см³ – для экспериментального). Это позволяет утверждать, что эффект обусловлен не тривиальным уплотнением, а качественным изменением структуры асфальтобетонного композита на микроуровне. По-видимому, процесс совместного помола приводит к созданию высокоактивного композиционного наполнителя, который при смешении с битумом формирует в объеме мастики прочный пространственный каркас. Этот каркас эффективно армирует структуру и улучшает адгезионное взаимодействие на границе раздела фаз.

Таким образом, результаты эксперимента подтверждают высокую эффективность метода механической активации для введения УНМ в состав асфальтобетонных смесей и наглядно иллюстрируют один из путей практической реализации потенциала наномодификаторов в дорожном строительстве.

Дискуссия, нерешенные проблемы и перспективы

Проведенный анализ данных источников и результаты собственных предварительных исследований убедительно доказывают, что углеродные наноматериалы являются мощным инструментом для направленной модификации дорожных композиций. Однако на пути от лабораторных успехов к широкому промышленному внедрению стоит ряд фундаментальных и прикладных проблем, требующих своего решения.

Центральной научной и технологической задачей остается проблема диспергирования и стабильности наночастиц в битумной матрице. Несмотря на существование различных подходов, до сих пор отсутствуют унифицированные методики контроля качества дисперсности УНМ в вяжущем. Это затрудняет сравнение результатов, полученных разными научными группами, и не позволяет гарантировать стабильность свойств модифицированного материала в промышленных масштабах.

Второй важнейшей нерешенной проблемой является оценка долгосрочной эффективности и старения модифицированных систем. Подавляющее большинство исследований ограничивается краткосрочными лабораторными испытаниями. Отсутствуют данные о поведении нанокомпозитов после нескольких лет эксплуатации под воздействием транспортных нагрузок, циклических перепадов температур и ультрафиолетового излучения. Неясно, сохраняется ли армирующая структура или происходит ее деградация с течением времени.

Третий блок вопросов связан с экономической целесообразностью и экологической безопасностью. Высокая стоимость УНМ на сегодняшний день является серьезным сдерживающим фактором. Необходимо проведение комплексных технико-экономических расчетов, учитывающих не только начальную стоимость материалов, но и полный жизненный цикл покрытия, включая увеличение срока службы и снижение затрат на ремонт. Одновременно с этим требуется глубокое изучение вопросов безопасности на всех этапах, от производства и укладки, где существует риск вдыхания наночастиц в виде аэрозолей, до утилизации и переработки старого асфальтобетона.

Несмотря на все вызовы, перспективы дальнейших исследований в данной области чрезвычайно широки. Наиболее перспективным направлением представляется переход от задач простого упрочнения к созданию multifunctional дорожных покрытий. Высокая электро- и теплопроводность УНМ открывает возможность разработки асфальтобетонных композитов с функцией самодиагностики, например, для мониторинга напряжений и трещин по изменению электросопротивления, а также с функцией антиобледенения или самовосстановления за счет индукционного нагрева. Дальнейшее развитие должно быть направлено на создание гибридных модификаторов и оптимизацию их составов для получения комплекса заданных свойств при минимальной стоимости.

Заключение

В результате проведенного исследования были сделаны следующие выводы.

1. Анализ данных источников показал, что ключевые открытия в области углеродных наноматериалов (фуллерены, УНТ, графен) сформировали научную базу для их применения в качестве высокоэффективных модификаторов дорожных асфальтобетонных композитов. Установлено, что главная технологическая проблема, ограничивающая их потенциал, – склонность наночастиц к агрегации в битумной матрице. Основными подходами к решению этой проблемы являются механическое смешение, ультразвуковая обработка, химическая функционализация и использование материалов-носителей.

2. Экспериментально доказана высокая эффективность комплексной модификации битума, сочетающей введение полимера SBS и УНМ. Данный подход позволяет фундаментально изменить реологические свойства вяжущего, что подтверждается кардинальным повышением температуры размягчения с 48,2 °С (исходный битум) до 76,5 °С (комплексно-модифицированный состав). Это свидетельствует о формировании прочной трехмерной нанополимерной сетки в объеме вяжущего.

3. Установлено, что введение УНМ в состав асфальтобетона на минеральном носителе, полученном методом механоактивации, является эффективным способом структурного армирования композита. Этот метод обеспечивает практически двукратное увеличение предела прочности при сжатии при 50 °С (с 0,78 до 1,50 МПа) и существенное понижение водонасыщения, что напрямую влияет на повышение долговечности дорожного покрытия.

4. Сравнительный анализ двух методов показал их различную направленность: комплексная модификация вяжущего позволяет создавать материалы с уникальным диапазоном рабочих температур, в то время как введение УНМ на носителе направлено на максимальное упрочнение структуры асфальтобетона в целом. Выбор конкретного метода должен определяться поставленной инженерной задачей. Перспективными направлениями дальнейших исследований являются разработка стандартизированных методов контроля дисперсности, изучение процессов старения нанокомпозитов и создание multifunctional дорожных покрытий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. C60: Buckminsterfullerene / H.W. Kroto, J.R. Heath, S.C. O'Brien [et al.] // Nature. 1985. Vol. 318. P. 162–163.
2. Мищенко С.В., Ткачев А.Г. Углеродные наноматериалы. Производство, свойства, применение. Москва : Машиностроение-1, 2008. 320 с.
3. Головин Ю.И. Введение в нанотехнологию. Москва: Машиностроение, 2003. 112 с.
4. Crystal structure and bonding of ordered C60 / W.J.F. David [et al.] // Nature. 1991. Vol. 353. P. 147–149.
5. Prassides K. Fullerene-Based Materials: Structures and Properties. Berlin; New York : Springer, 2004. 283 p.
6. Kroto, H.W., Fischer J.E., Cox D.E. The Fullerenes. London : Pergamon Press, 1993. 163 p.
7. Коваленко В.И., Хаматгалимов А.Р. Структура и стабильность высших фуллеренов. Москва : Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова, 2019. 212 с.

CARBON NANOMATERIALS FOR ROAD CONSTRUCTION: MODIFICATION OF BITUMINOUS BINDERS AND ASPHALT CONCRETES

8. Соколов В.И., Станкевич И.В. Фуллерены – новые аллотропные формы углерода, электронное строение и химические свойства // *Успехи химии*. 1993. Т. 62, № 5. С. 455–473.
9. Елецкий А.В., Смирнов Б.М. Фуллерены и структура углерода // *Успехи физических наук*. 1995. Т. 165, № 9. С. 977–1009.
10. Iijima, S. Helical microtubules of graphitic carbon // *Nature*. 1991. Vol. 354. P. 56–58.
11. The wondrous world of carbon nanotubes / M. Daenen [et al.]. Eindhoven : Eindhoven university of technology, 2003. 96 p.
12. Liu M.L., Cowley J.M. Structures of the helical carbon nanotubes // *Carbon*. 1994. Vol. 32, iss: 3. P. 393–403.
13. Харрис П. Углеродные нанотрубы и родственные структуры. Новые материалы XXI века. Москва : Техносфера, 2003. 336 с.
14. Ткачев А.Г., Золотухин И.В. Аппаратура и методы синтеза твердотельных наноструктур. Москва : Машиностроение-1, 2007. 316 с.
15. Yosida Y. Enhanced flux pinning in superconductors by embedding carbon nanotubes with BSCCO materials // *Applied Physics Letters*. 1994. Vol. 64. P. 3048–3050.
16. Дьячков П.Н. Углеродные нанотрубки: строение, свойства, применения. Москва : БИНОМ ; Лаборатория знаний, 2006. 293 с.
17. Елецкий А.В. Механические свойства углеродных наноструктур и материалов на их основе // *Успехи химии*. 2007. Т. 177, № 3. С. 233–274.
18. Jiménez-Suárez A. , Prolongo G. Graphene Nanoplatelets // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, № 5. Art. 1753.
19. Synthesis of graphene and its applications: A review / W. Choi, I. Lahiri, R. Seelaboyina, Y.S. Kang // *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. 2010. Vol. 35. P. 52–71.
20. Geim A.K., Novoselov K.S. The rise of graphene // *Nature materials*. 2007. Vol. 6. P. 183–191.
21. Properties and characterization techniques of graphene modified asphalt binders / R. Polo-Mendoza [et al.] // *Nanomaterials*. 2023. Vol. 13, № 5. Art. 955. P. 27
22. Insights on synthesis and applications of graphene-based materials in wastewater treatment: A review / A. Saravanan [et al.] // *Chemosphere*. 2022. Vol. 298. Art. 134284.
23. Mechanical properties of asphalt concrete modified with carbon nanotubes (CNTs) / M.S. Eisaa, A. Mohamady, M.E. Basiouny [et al.] // *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Vol. 16. Art. e00930.
24. Evaluation of mechanical performance and modification mechanism of asphalt modified with graphene oxide and warm mix additives / K. Liu [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 193. P. 87–96.
25. Liu K., Zhang K., Shi X. Performance evaluation and modification mechanism analysis of asphalt binders modified by graphene oxide // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 163. P. 880–889.
26. Afshin A., Behnood A. Nanomaterials in asphalt pavements: A state-of-the-art review // *Cleaner Waste Systems*. 2025. Vol. 10. Art. 100214.
27. Carbon Nanotubes (CNTs) in Asphalt Binder: Homogeneous Dispersion and Performance Enhancement / M.F. Haq, N. Ahmad, M.A. Nasir [et al.] // *Applied Sciences*. 2018. Vol. 8, № 12. Art. 2651.
28. Effect of Carbon Nanofibers on Physical, Adhesion and Rheological Properties of Liquid Epoxidized Natural Rubber Modified Asphalt / R.A. Al-Mansob, H.Y. Katman, A.M. Al-Sabaei [et al.] // *Materials*. 2022. Vol. 15, № 11. Art. 3870.
29. Mehdinazar M., Rasouli Z., Hamed G.H. Effect of nano carbonate calcium on the low temperature performance of bitumen and asphalt mixtures in acidic and alkaline moisture // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Art. 19232.
30. Preparation and Properties of Carbon Nanofiber Modified Emulsified Asphalt Based on Ultrasonication and Surfactant and the Impact of SBR and NH₄Cl / X. Liu, Y. An, J. Feng [et al.] // *Frontiers in Materials*. 2020. Vol. 7. Art. 209.
31. Efficacy of octadecylamine-functionalized graphene versus graphene nanoplatelets and graphene oxide as asphalt binder modifiers for high-temperature performance / H.K. Almashaqbeh, M. Majdoub, D. Sengottuvelu [et al.] // *Materials and Structures*. 2025. Vol. 58. Art. 44.
32. The impact of carbon nano-fiber modification on asphalt binder rheology / M.J. Khattak, A. Khattab, H.R. Rizvi, P. Zhang // *Construction and building materials*. 2012. Vol. 30. P. 257 – 264.
33. Khattak M.J., Khattab A., Rizvi H.R. Mechanistic characteristics of asphalt binder and asphalt matrix modified with nanofibers // *Proceedings of the Geo-Frontiers*. 2011. P. 4812–4822.
34. Xiao A.N., Amirkhanian A.N., Amirkhanian S.N. Influence of carbon nanoparticles on the rheological characteristics of short-term aged asphalt binders // *Journal of materials in civil engineering*. 2011. Vol. 23, № 4. P. 423–431.
35. Rheological properties and chemical analysis of nanoclay and carbon microfiber modified asphalt with Fourier transform infrared spectroscopy / H. Yao [et al.] // *Construction and building materials*. 2013. Vol. 38. P. 327–337.
36. Applications of Lambert-Beer law in the preparation and performance evaluation of graphene modified asphalt / G. Huang [et al.] // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 273. Art. 121582.
37. Dispersion, compatibility, and rheological properties of graphene-modified asphalt binders / Y. Wang [et al.] // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 350. Art. 128886.
38. Multi-scale enhancement mechanisms of graphene oxide on styrene–butadiene–styrene modified asphalt: An exploration from molecular dynamics simulations / K. Hu [et al.] // *Materials & Design*. 2021. Vol. 208. Art. 109901.
39. Experimental study on mechanism, aging, rheology and fatigue performance of carbon nanomaterial. SBS-modified asphalt binders / R. Wang, M. Yue, Y. Xiong, J. Yue // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 268. Art. 121189.
40. Amirkhanian A., Xiao F., Amirkhanian S. Evaluation of high temperature rheological characteristics of asphalt binder with carbon nano particles // *Journal of testing and evaluation*. 2011. Vol. 39, № 4. P. 583–591.
41. Evaluation of asphalt blended with low percentage of carbon micro-fiber and nanoclay / H. Yao [et al.] // *Journal of testing and evaluation*. 2013. Vol. 41, № 2. P. 278–288.
42. Yao H., You Z. Effectiveness of micro- and nanomaterials in asphalt mixtures through dynamic modulus and rutting tests // *Journal of nanomaterials*. 2016. Vol. 2016. Art. 2645250 – P. 1–14.

43. Fakhri M., Shahryari E. The effects of nano zinc oxide (ZnO) and nano reduced graphene oxide (RGO) on moisture susceptibility property of stone mastic asphalt (SMA) // *Journal of basic and applied scientific research*. 2013. Vol. 2, № 2. P. 278–288.
44. The Self-Healing Performance of Carbon-Based Nanomaterials Modified Asphalt Binders Based on Molecular Dynamics Simulations / Y. Gong, J. Xu, E. Yan, J. Cai // *Frontiers in Materials*. 2021. Vol. 7. Art. 599551.
45. Carbon Nanomaterials for Enhancing the Thermal, Physical and Rheological Properties of Asphalt Binders / Z. Li, X. Yu, Y. Liang, S. Wu // *Materials*. 2021. Vol. 14, № 10. Art. 2585.

REFERENCES

1. C60: Buckminsterfullerene / H.W. Kroto, J.R. Heath, S.C. O'Brien [et al.] // *Nature*. 1985. Vol. 318. P. 162–163.
2. Mishchenko S.V., Tkachev A.G. Uglерodnye nanomaterialy. Proizvodstvo, svoystva, primeneniye [Carbon nanomaterials. Production, properties, applications]. Moskva : Mashinostroeniye-1, 2008. 320 s.
3. Golovin Yu.I. Vvedeniye v nanotekhnologiyu [Introduction to nanotechnology]. Moskva : Mashinostroeniye, 2003. 112 s.
4. Crystal structure and bonding of ordered C60 / W.J.F. David [et al.] // *Nature*. 1991. Vol. 353. P. 147–149.
5. Prassides K. Fullerene-Based Materials: Structures and Properties. Berlin; New York : Springer, 2004. 283 p.
6. Kroto, H.W., Fischer J.E., Cox D.E. The Fullerenes. London : Pergamon Press, 1993. 163 p.
7. Kovalenko V.I., Khamatgalimov A.R. Stroyeniye i stabil'nost' vyshchikh fullerenov [Structure and stability of higher fullerenes]. Moskva : Institut organicheskoy i fizicheskoy khimii im. A.E. Arbuzova, 2019. 212 s.
8. Sokolov V.I., Stankevich I.V. Fullereny – novye allotropnye formy ugleroda, elektronnoye stroeniye i khimicheskie svoystva [Fullerenes – new allotropic forms of carbon, electronic structure and chemical properties] // *Uspekhi khimii*. 1993. T. 62, № 5. S. 455–473.
9. Eletskii A.V., Smirnov B.M. Fullereny i struktura ugleroda [Fullerenes and carbon structure] // *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 1995. T. 165, № 9. S. 977–1009.
10. Iijima, S. Helical microtubules of graphitic carbon // *Nature*. 1991. Vol. 354. P. 56–58.
11. The wondrous world of carbon nanotubes / M. Daenen [et al.]. Eindhoven : Eindhoven university of technology, 2003. 96 p.
12. Liu M.L., Cowley J.M. Structures of the helical carbon nanotubes // *Carbon*. 1994. Vol. 32, iss: 3. Pp. 393–403.
13. Harris P. Uglерodnye nanotruby i rodstvennyye struktury [Carbon nanotubes and related structures]. Novye materialy XXI veka. Moskva : Tekhnosfera, 2003. 336 s.
14. Tkachev A.G., Zolotukhin I.V. Apparatura i metody sinteza tverdotel'nykh nanostruktur [Equipment and synthesis methods of solid-state nanostructures]. Moskva : Mashinostroeniye-1, 2007. 316 s.
15. Yosida Y. Enhanced flux pinning in superconductors by embedding carbon nanotubes with BSCCO materials // *Applied Physics Letters*. 1994. Vol. 64. P. 3048–3050.
16. Dyachkov P.N. [Uglерodnye nanotrubki. Proizvodstvo, svoystva, primeneniye [Carbon nanotubes: structure, properties, applications]. Moskva : BINOM; Laboratoriya znaniy, 2006. 293 s.
17. Eletskii A.V. Mekhanicheskie svoystva uglerodnykh nanostruktur I materialov na ikh osnove [Mechanical properties of carbon nanostructures and materials based on them] // *Uspekhi khimii*. 2007. T. 177, № 3. P. 233–274.
18. Jiménez-Suárez A., Prolongo G. Graphene Nanoplatelets // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, № 5. Art. 1753.
19. Synthesis of graphene and its applications: A review / W. Choi, I. Lahiri, R. Seelaboyina, Y.S. Kang // *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. 2010. Vol. 35. P. 52–71.
20. Geim A.K., Novoselov K.S. The rise of graphene // *Nature materials*. 2007. Vol. 6. P. 183–191.
21. Properties and characterization techniques of graphene modified asphalt binders / R. Polo-Mendoza [et al.] // *Nanomaterials*. 2023. Vol. 13, № 5. Art. 955. P. 27
22. Insights on synthesis and applications of graphene-based materials in wastewater treatment: A review / A. Saravanan [et al.] // *Chemosphere*. 2022. Vol. 298. Art. 134284.
23. Mechanical properties of asphalt concrete modified with carbon nanotubes (CNTs) / M.S. Eisaa, A. Mohamady, M.E. Basiouny [et al.] // *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Vol. 16. Art. e00930.
24. Evaluation of mechanical performance and modification mechanism of asphalt modified with graphene oxide and warm mix additives / K. Liu [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 193. P. 87–96.
25. Liu K., Zhang K., Shi X. Performance evaluation and modification mechanism analysis of asphalt binders modified by graphene oxide // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 163. P. 880–889.
26. Afshin A., Behnood A. Nanomaterials in asphalt pavements: A state-of-the-art review // *Cleaner Waste Systems*. 2025. Vol. 10. Art. 100214.
27. Carbon Nanotubes (CNTs) in Asphalt Binder: Homogeneous Dispersion and Performance Enhancement / M.F. Haq, N. Ahmad, M.A. Nasir [et al.] // *Applied Sciences*. 2018. Vol. 8, № 12. Art. 2651.
28. Effect of Carbon Nanofibers on Physical, Adhesion and Rheological Properties of Liquid Epoxidized Natural Rubber Modified Asphalt / R.A. Al-Mansob, H.Y. Katman, A.M. Al-Sabaei [et al.] // *Materials*. 2022. Vol. 15, № 11. Art. 3870.
29. Mehdi-nazar M., Rasouli Z., Hamedi G.H. Effect of nano carbonate calcium on the low temperature performance of bitumen and asphalt mixtures in acidic and alkaline moisture // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Art. 19232.
30. Preparation and Properties of Carbon Nanofiber Modified Emulsified Asphalt Based on Ultrasonication and Surfactant and the Impact of SBR and NH4Cl / X. Liu, Y. An, J. Feng [et al.] // *Frontiers in Materials*. 2020. Vol. 7. Art. 209.
31. Efficacy of octadecylamine-functionalized graphene versus graphene nanoplatelets and graphene oxide as asphalt binder modifiers for high-temperature performance / H.K. Almashaqbeh, M. Majdoub, D. Sengottuvelu [et al.] // *Materials and Structures*. 2025. Vol. 58. Art. 44.
32. The impact of carbon nano-fiber modification on asphalt binder rheology / M.J. Khattak, A. Khattab, H.R. Rizvi, P. Zhang // *Construction and building materials*. 2012. Vol. 30. P. 257 – 264.

CARBON NANOMATERIALS FOR ROAD CONSTRUCTION: MODIFICATION OF BITUMINOUS BINDERS AND ASPHALT CONCRETES

33. Khattak M.J., Khattab A., Rizvi H.R. Mechanistic characteristics of asphalt binder and asphalt matrix modified with nano-fibers // *Proceedings of the Geo-Frontiers*. 2011. P. 4812–4822.
34. Xiao A.N., Amirkhanian A.N., Amirkhanian S.N. Influence of carbon nanoparticles on the rheological characteristics of short-term aged asphalt binders // *Journal of materials in civil engineering*. 2011. Vol. 23, № 4. P. 423–431.
35. Rheological properties and chemical analysis of nanoclay and carbon microfiber modified asphalt with Fourier transform infrared spectroscopy / H. Yao [et al.] // *Construction and building materials*. 2013. Vol. 38. P. 327–337.
36. Applications of Lambert-Beer law in the preparation and performance evaluation of graphene modified asphalt / G. Huang [et al.] // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 273. Art. 121582.
37. Dispersion, compatibility, and rheological properties of graphene-modified asphalt binders / Y. Wang [et al.] // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 350. Art. 128886.
38. Multi-scale enhancement mechanisms of graphene oxide on styrene-butadiene-styrene modified asphalt: An exploration from molecular dynamics simulations / K. Hu [et al.] // *Materials & Design*. 2021. Vol. 208. Art. 109901.
39. Experimental study on mechanism, aging, rheology and fatigue performance of carbon nanomaterial. SBS-modified asphalt binders / R. Wang, M. Yue, Y. Xiong, J. Yue // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 268. Art. 121189.
40. Amirkhanian A., Xiao F., Amirkhanian S. Evaluation of high temperature rheological characteristics of asphalt binder with carbon nano particles // *Journal of testing and evaluation*. 2011. Vol. 39, № 4. P. 583–591.
41. Evaluation of asphalt blended with low percentage of carbon micro-fiber and nanoclay / H. Yao [et al.] // *Journal of testing and evaluation*. 2013. Vol. 41, № 2. P. 278–288.
42. Yao H., You Z. Effectiveness of micro- and nanomaterials in asphalt mixtures through dynamic modulus and rutting tests // *Journal of nanomaterials*. 2016. Vol. 2016. Art. 2645250 – P. 1–14.
43. Fakhri M., Shahryari E. The effects of nano zinc oxide (ZnO) and nano reduced graphene oxide (RGO) on moisture susceptibility property of stone mastic asphalt (SMA) // *Journal of basic and applied scientific research*. 2013. Vol. 2, № 2. P. 278–288.
44. The Self-Healing Performance of Carbon-Based Nanomaterials Modified Asphalt Binders Based on Molecular Dynamics Simulations / Y. Gong, J. Xu, E. Yan, J. Cai // *Frontiers in Materials*. 2021. Vol. 7. Art. 599551.
45. Carbon Nanomaterials for Enhancing the Thermal, Physical and Rheological Properties of Asphalt Binders / Z. Li, X. Yu, Y. Liang, S. Wu // *Materials*. 2021. Vol. 14, № 10. Art. 2585.

Информация об авторах

А.А. Афанасенко – научный сотрудник;
П.П. Яцевич – научный сотрудник.

Information about the authors

A.A. Afanasenko – Research Scientist;
P.P. Yatsevich – Research Scientist.

Статья поступила в редакцию 22.09.2025; одобрена после рецензирования 13.10.2025; принята к публикации 13.10.2025.
The article was submitted: 22.09.2025; approved after reviewing: 13.10.2025; accepted for publication: 13.10.2025.

Научная статья
УДК 656.073.235
doi:10.31079/2415-8658-2025-4-25-32

СОСТОЯНИЕ КОНТЕЙНЕРНОЙ ЛОГИСТИКИ НА ВОСТОЧНОМ ПОЛИГОНЕ В СОВРЕМЕННЫХ ПОЛИТИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ НА ПРИМЕРЕ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТЫ ПАО «ТРАНСКОНТЕЙНЕР»

Брытков Владимир Сергеевич

Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия, vladimirbrytkov99@yandex.ru

Аннотация. Проведён анализ состояния контейнерной логистики на Восточном полигоне железных дорог с учетом современного политического и экономического развития страны на примере организации работы ПАО «ТрансКонтейнер». Предпринята попытка выделить мировые тенденции развития контейнерной логистики и уровни контейнеризации мировой экономики и России, обозначить изменения и новые тренды, которые возобладают в отрасли в среднесрочной перспективе.

Особое внимание уделено переориентации грузопотока внутри страны в направлении стран Азиатско-Тихоокеанского региона. В связи с этим считается актуальным выявить степень влияния новых политико-экономических условий на развитие контейнерных перевозок. Рассматриваются новые возможности и вызовы, стоящие перед отраслью; сделан вывод о том, что контейнеризация российской транспортной логистики с учетом модернизации терминально-складской инфраструктуры позволит стране стать опорной частью транзитных грузоперевозок, обеспечит конкурентоспособность экспорта природных ресурсов, будет способствовать ускоренному развитию транзитного потенциала и интеграции России в международный транспортный коридор «Восток–Запад».

Проведенный анализ позволил определить, что Восточный полигон имеет значительный технический и экономический потенциал. Отмечено, что российская отрасль контейнерной логистики в современных политико-экономических условиях испытывает трудности, но прогнозы относительно развития контейнерных перевозок по Восточному полигону достаточно оптимистичные.

Ключевые слова: Восточный полигон железных дорог, управление транспортными потоками, организация работы транспортной инфраструктуры, транспортные коридоры, контейнерная логистика

Original article

THE STATE OF CONTAINER LOGISTICS IN THE EASTERN POLYGON IN MODERN POLITICAL AND ECONOMIC CONDITIONS, EXEMPLIFIED BY ORGANIZATION OF WORK AT TRANSCONTAINER PJSC

Brytkov Vladimir S.

Irkutsk State University of Railway Transport, Irkutsk, Russia, vladimirbrytkov99@yandex.ru

Abstract. In this article, the author analyzes the state of container logistics in the Eastern railway polygon, taking into account the current political and economic development of the country, using the example of the organization of work at TransContainer PJSC. The author attempts to identify global trends in the development of container logistics and the levels of containerization in the global economy and Russia, as well as to identify changes and new trends that will prevail in the industry in the medium term.

Special attention is paid to the reorientation of cargo traffic within the country towards the countries of the Asia-Pacific region. In this regard, it is considered relevant to identify the extent of the influence of new political and economic conditions on the development of container transportation. The article examines new opportunities and challenges facing the industry, and concludes that the containerization of Russian transport logistics, taking into account the modernization of terminal and warehouse infrastructure, will allow the country to become a key player in transit cargo transportation, ensure the competitiveness of natural resource exports, and contribute to the accelerated development of transit potential and Russia's integration into the international East-West transport corridor.

The analysis conducted has revealed that the Eastern polygon has significant technical and economic potential. In conclusion, the author notes that the Russian container logistics industry is facing difficulties in the current political and economic environment, but the forecasts for the development of container transportation on the Eastern polygon are quite optimistic.

Keywords: Eastern railway polygon, traffic flow management, organization of work of transport infrastructure, transport corridors, container logistics

Введение

Сложная экономическая ситуация в стране накладывает свой отпечаток на сферу транспортно-логистических услуг, включая контейнерные перевозки, которые, как показывает статистика, имеют тренд к увеличению объемов. С 2022 г. внутри рос-

сийской экономики начинаются изменения, вызванные СВО и санкциями, введенными в отношении страны. Многие российские грузоотправители, ранее использовавшие для отправки грузов порты акватории Балтийского моря, перенаправили свои грузопотоки на восточное направление, но инфра-

структурный комплекс Восточного полигона оказался не готов к таким изменениям.

Второе десятилетие XXI в. началось с тяжелейших вызовов, стоящих перед мировой экономикой. Эпидемии и локдауны, военные конфликты и экологические проблемы непрерывно оказывают влияние на структуру и объем потребления товаров, изменяя привычные экономические связи. Это, безусловно, затрагивает все стороны жизни общества и транспортную логистику как неразрывную часть экономической системы, оказывающую большое влияние на конечную стоимость и время доставки товаров в разные части мира. Стоит отметить, что подобные изменения происходят в истории регулярно, и для одних это становится вызовом и временем новых возможностей, а другие обречены на экономическое угасание.

Отрасль контейнерных перевозок уже доказала свою эффективность и универсальность в транспортировке грузов. Тенденция к усилению контейнеризации грузопотоков на протяжении последних десятилетий позволяет сделать вывод, что данный способ доставки товаров будет только увеличивать свою долю в структуре транспортировки грузов. Российская Федерация в меняющейся мировой экономике, где экономическое доминирование переходит от стран Запада (глобального Севера) к странам Юго-Восточной Азии, прежде всего Китая (глобального Юга), может занять выгодное экономическое положение в торговом обороте между Европой и Азиатско-Тихоокеанским регионом. Россия обладает самыми протяженными железными магистралями, регулярно модернизируя и совершенствуя свою инфраструктуру под колебания грузопотоков, соединяющих её части. Правительство страны проводит политику по развитию Северного морского пути как альтернативному существующим морским магистралям через южные океаны.

На российском рынке контейнерных перевозок присутствуют различные игроки, которые являются как частными, так и государственными компаниями. Государство как главная институциональная сила задает тренды по реагированию на внешние вызовы, стоящие перед экономикой в целом и транспортной логистикой в частности. При этом доля частных компаний, владеющих собственной терминально-складской инфраструктурой, транспортом и собственными сервисами по перевозке грузов, остается значительной. Наиболее крупной в этом отношении компанией является ПАО «ТрансКонтейнер», его доля на протяжении долгих лет остается самой высокой на рынке. В связи с этими факторами актуально проследить, как новые тенденции и реалии сказываются на отрасли контейнерных перевозок, сквозь призму самой крупной компании страны, представленной на рынке, и как отрасль и экономика в целом адаптируются к новым политико-экономическим реалиям современности.

Новые возможности и вызовы, стоящие перед отраслью контейнерных перевозок

Уровень контейнеризации мировой торговли остается небольшим, в среднем это около 13–14 %. В мировой транспортной логистике в структуре поставок доминируют крупнотоннажные грузы, такие как железная руда, уголь, нефть, не тяготеющие к использованию контейнеров при транспортировке. С другой стороны, существуют направления перевозок, полностью закрывающие потребность в транспортировке грузов специальными судами, перевозящими контейнеры, – контейнерозамами. Анализ статистических данных показывает, что ежегодно более 90 % взаимной морской внешней торговли стран Европы и Китая составляют грузы в контейнерах, и тенденция к расширению использования контейнеров для обслуживания международных грузоперевозок сохраняется уже не одно десятилетие (рис. 1) [1].

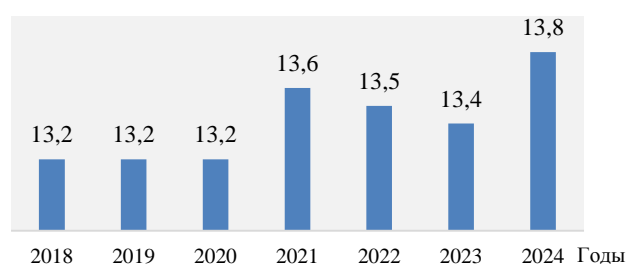


Рис. 1. Доля контейнерных грузов в объеме мировой торговли, %

Вместе с тем санкции и ограничения, вводимые время от времени отдельными странами и группами стран на некоторые товарные позиции внешнеторговых поставок, могут приводить к снижению удельной стоимости 1 т перевозимого груза, что негативно сказывается на общем уровне контейнеризации международных грузоперевозок, поскольку в контейнерах, как правило, транспортируются более дорогие грузы. По предварительным оценкам в 2023 г. такое снижение условной средней цены внешнеторгового груза (более чем на 7 % относительно уровня 2022 г.) было обусловлено понижающей тенденцией в развитии мировых цен на энергоресурсы, сырье и готовую продукцию, что, в свою очередь, не стимулировало расширение контейнерных перевозок [1, 2].

Уровень контейнеризации в России остается невысоким, около 7 % по сравнению с США (40 %), Европейским Союзом (20 %), Китаем (15 %). Такая тенденция связана с тем, что в данных странах сконцентрированы ключевые мировые контейнерные порты-хабы, в сообщении с которыми железной дорогой производится развоз грузов с морских контейнерных линий.

На сегодняшний день основным очагом зарождения контейнерного грузопотока является Китай (рис. 2).

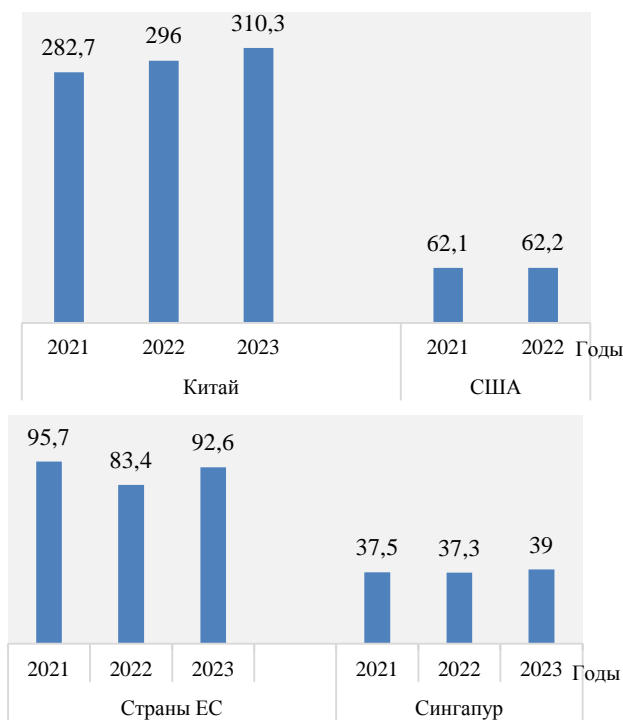


Рис. 2. Контейнерооборот портов отдельных стран, млн ДФЭ

Российская Федерация на современном этапе развития находится в стадии сближения с КНР. Восточный полигон, связывающий восток и запад России, имеет ряд преимуществ в транзитных перевозках грузов между странами Азиатско-Тихоокеанского региона и Европой. Во-первых, путь, который преодолевает груз от отправителя через магистраль Восточного полигона к получателю, доезжает быстрее, чем по морскому пути через Суэцкий канал. Во-вторых, транзитная страна – одна, и она политически устойчива, поэтому риски, а следовательно, и издержки на перевозки ниже [3].

События 2024 г. показали уязвимость «узких» мест мировых маршрутов морской торговли. Так, активизация боевых действий в акватории Красного моря заставила крупнейших контейнерных операторов в оперативном режиме перестраивать маршруты следования контейнеровозов через Мыс Доброй Надежды, а также искать дополнительные возможности по перевозкам контейнеров сухопутными маршрутами. Так, по сети ОАО «РЖД» прирост перевозок контейнеров в 2024 г. на направлении Китай–Европа–Китай составил + 84 % к уровню 2023 г. и остается стабильным на начало 2025 г. [1–3].

По оценкам зарубежных аналитических агентств к 2035 г. объем мировых контейнерных перевозок может составить 240–260 млн ДФЭ (рис. 3).

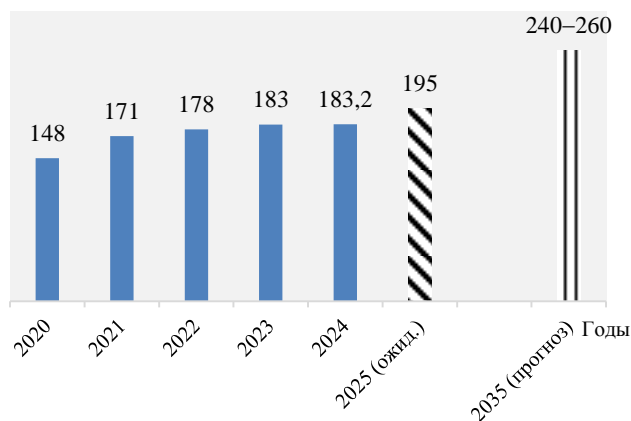


Рис. 3. Мировые контейнерные перевозки, млн ДФЭ

Согласно ожиданиям участников рынка, объем контейнерных перевозок на сети ОАО «РЖД» может увеличиться к 2035 г. в полтора раза – до 10–12 млн ДФЭ. Среднегодовой рост рынка составит около 3,4 % (рис. 4).

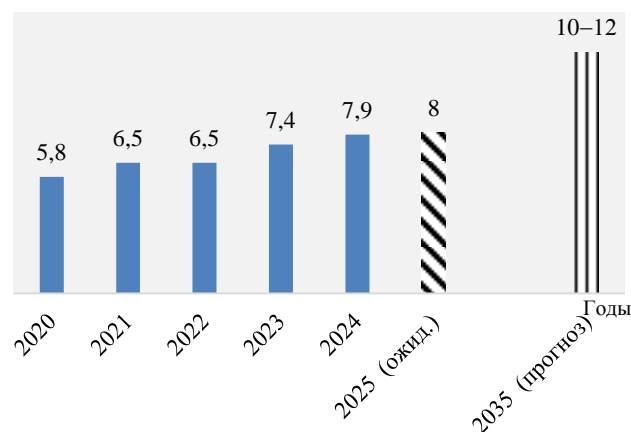


Рис. 4. Контейнерные перевозки по сети ОАО «РЖД», млн ДФЭ

Проведенный анализ показал, что ключевыми факторами положительной динамики роста контейнеризации в России могут стать:

- развитие логистической инфраструктуры за счет строительства новых терминалов и модернизации существующих;
- расширение применения контейнеров для транспортировки различных номенклатур грузов;
- расширение цифровых сервисов и ускоренное развитие систем IoT (Internet of Things – Интернет вещей) на транспорте (устройства, позволяющие отслеживать состояние груза, его местонахождение и т.д.).

По итогам 2024 г. перевозки контейнеров по сети ОАО «РЖД» составили 7,9 млн ДФЭ. Несмотря на снижение перевозок в феврале и марте, в I квартале 2025 г. сохранилась тенденция к росту контейнерных перевозок по сети ОАО «РЖД». При сохра-

нении положительной динамики в оставшиеся кварталы можно ожидать достижения уровня 8 млн ДФЭ к концу года [4–6].

Высокий темп контейнеризации грузовых перевозок позволит в дальнейшем увеличить интеграцию российских внешнеторговых потоков в международные логистические цепочки.

ПАО «ТрансКонтейнер» и его доля на рынке контейнерных перевозок

Публичное акционерное общество «ТрансКонтейнер» является крупнейшей российской транспортной компанией, в том числе в отрасли железнодорожных контейнерных перевозок, а также самым крупным интермодальным перевозчиком грузов в контейнерах в России [7, 8].

Компания предоставляет достаточно большой спектр услуг и сервисов своим клиентам, широкие возможности по перевозке грузов, в том числе скоропортящихся, насыпных и крупногабаритных. Транспортировка производится с использованием железнодорожного, морского и автомобильного транспорта, что позволяет ей быть востребованной на рынке транспортно-логистических услуг [7, 8].

По итогам работы 2024 г. доля ПАО «ТрансКонтейнер» на рынке железнодорожных контейнерных перевозок составила более 30 %. Проведенный анализ показал, что по сравнению с предыдущими периодами доля Общества сократилась с 41,5 % в 2020 г. до 40,6 % в 2021 г., с небольшим приростом в 2022 г. до 41,1 %, и продолжила снижение в 2023 и 2024 гг. до 36,4 % и 32,3 % соответственно (рис. 5) [7, 8].

Стоит отметить, что объемы контейнерных перевозок под контролем компании в анализируемом периоде хоть и уменьшились, но статистика показывает, что доля ПАО «ТрансКонтейнер» на транспортном рынке в целом остается достаточно высокой и составляет более 1/3 всех контейнерных перевозок в Российской Федерации.

После 2022 г. наблюдается тренд на снижение доли рынка, занимаемой компанией ПАО «ТрансКонтейнер», но при этом она по-прежнему является лидером по объемам перевозок, которые начиная с 2022 г. также имеют тенденцию к снижению (рис. 6) [7, 8].

Российский рынок контейнерных операторов на сети ОАО «РЖД» представлен достаточно большим перечнем компаний. Крупнейшими являются ПАО «ТрансКонтейнер» с объемом 1678 тыс. ДФЭ, АО «ОТЛК-ЕРА» – 753 тыс. ДФЭ, ООО «ФЕСКО Интегрированный транспорт» – 681 тыс. ДФЭ, ООО «Русский Контейнер» – 508 тыс. ДФЭ, ООО «Логопер» – 466 тыс. ДФЭ и др. (рис. 7) [1–3].

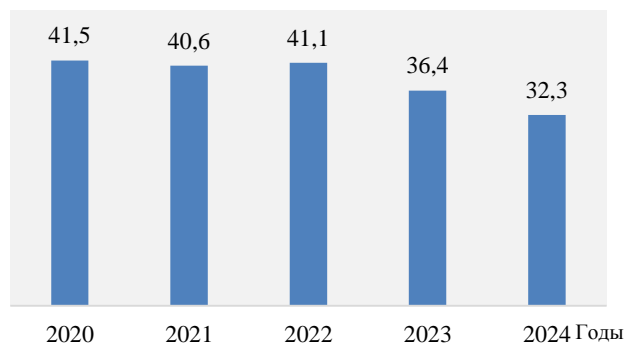


Рис. 5. Доля рынка по объему перевозок под контролем Общества, %

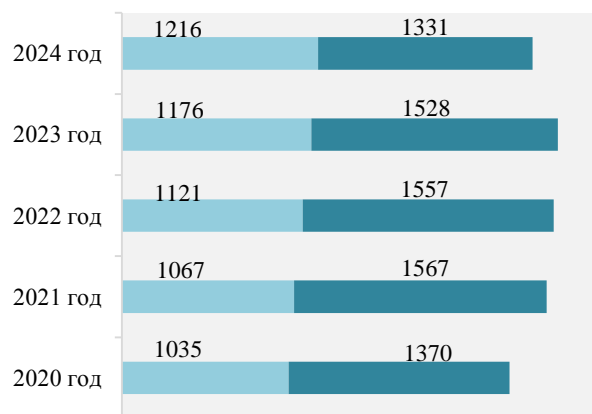


Рис. 6. Объемы внутренних и международных перевозок под контролем Общества, тыс. ДФЭ

Соотношение по парку подвижного состава следующее: наибольшее количество фитинговых платформ состоит на балансе ООО «Русский Контейнер» – 32,2 тыс. шт., ООО «Фирма Трансгарант» – 14,0 тыс. шт., ПАО «ТрансКонтейнер» – 6,8 тыс. шт., ООО «Логопер» – 6,4 тыс. шт. Анализ показал, что по размеру парка контейнеров, находящихся в оперировании отдельных контейнерных компаний, лидерами являются ПАО «ТрансКонтейнер» с объемом 140,8 тыс. шт., ООО «ФЕСКО» – 118,9 тыс. шт., ООО «Логопер» – 44,3 тыс. шт. [1–3]. Таким образом, ПАО «ТрансКонтейнер» – крупнейший оператор контейнерной логистики на сети ОАО «РЖД», оказывающий грузоотправителям и грузополучателям широкий спектр услуг по транспортировке, хранению и переработке грузов.

Лидирующие позиции ПАО «ТрансКонтейнер» на российском транспортно-логистическом рынке не позволяют компании в новых политических и экономических условиях в полном объеме сохранить имеющихся клиентов, но все же существует серьезный потенциал приобрести новых в Азиатско-Тихоокеанском регионе, реализуя тем самым мощный провозной потенциал Восточного полигона железных дорог.

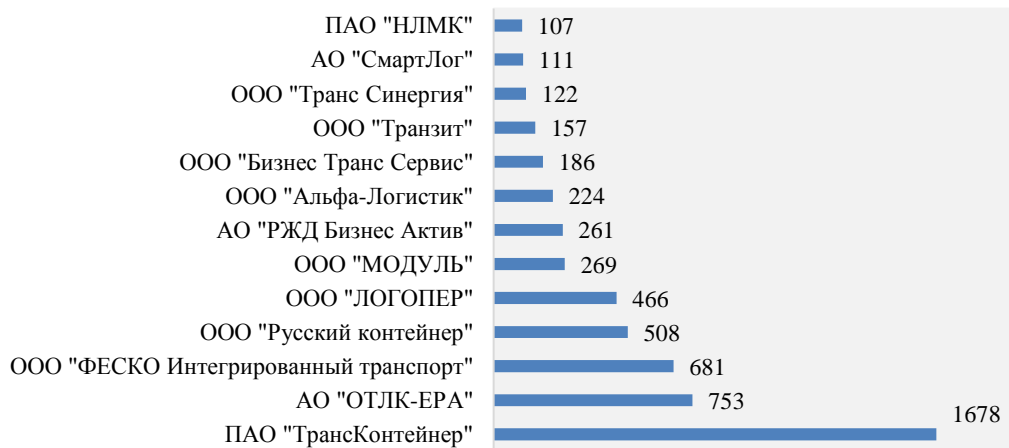


Рис. 7. Объемы перевозок контейнеров на сети ОАО «РЖД» в 2024 г. по операторам, тыс. ДФЭ

Условия функционирования ПАО «ТрансКонтейнер» в новых политико-экономических реалиях

Ситуация, в которой оказалась Российская Федерация после начала Специальной военной операции и волны санкционного давления, не имеет аналогов в истории. На сегодняшний день в экономике страны наблюдается значительная перестройка имеющихся логистических цепочек, обновление форматов транспортных коридоров как внутри самого государства, так и за его пределами. Причиной этого стал тот факт, что российские транспортные компании вместе с зарубежными партнерами находятся в постоянном поиске оптимальных маршрутов и схем поставок грузов для обхода введенных санкций и сокращения издержек процессов продвижения грузо- и контейнеропотоков в этих направлениях [9, 10].

Российская Федерация имеет выход в мировой океан, а следовательно, и во все международные водные транспортные коридоры через акватории Черного моря на юго-западе, Балтийского моря – на северо-западе, Баренцева и Белого – на севере, Охотского и Восточного – на востоке страны. После введения санкций, прекращения импорта и экспорта, за исключением пропуска нефтепродуктов, через морские порты и пограничные переходы Северо-Запада и Юго-Запада большая часть грузопотока была переориентирована на восточное направление и незначительно – на южное – пограничные переходы Казахстана [11–13].

Так, если в 2021 г. контейнерным грузопотоком через Северо-Запад в экспортном направлении (по всем видам транспорта) было перевезено 14,7 млн т, то в 2024 г. – всего 10,5 млн т. Анализ показывает, что в импортном направлении тенденции еще больше усиливаются: если в 2021 г. было перевезено 12,5 млн т, то в 2024 г. – 6,0 млн т грузов. Разница 2024 г. к 2021 г. составляет 4,2 млн т в экспорте и 6,5 млн т в импорте [13, 14].

На пограничных переходах и морских портах Восточного полигона железных дорог наблюдается обратная ситуация. Экспорт грузов в контейнерах на морские порты Дальнего Востока с учетом всех видов транспорта имеет тенденцию стабильного роста. Так, в 2021 г. экспорт составил 5,6 млн т, в 2024 г. – 6,5 млн т, т.е. прирост равен 0,9 млн т груза. В импортном направлении в 2021 г. перевезено 8,8 млн т, в 2024 г. – 14,7 млн т, прирост составил 5,9 млн т [15].

На железнодорожных погранпереходах общий тренд также сохраняется. В экспортном направлении в 2021 г. было перевезено 6,1 млн т, в 2024 г. – 8,2 млн т, прирост составил 2,1 млн т. В импортном направлении в 2021 г. было перевезено 1,9 млн т груза, в 2024 г. – 3,1 млн т, прирост составил 1,2 млн т [3, 6, 15].

Таким образом, можно констатировать, что до 2022 г. основной поток импортных контейнеров следовал через российские морские порты Финского залива и в дальнейшем направлялся в центральные регионы страны. Начиная с 2022 г. произошла переориентация внешнеторговых перевозок контейнеров с портов Финского залива на порты и пограничные переходы Дальнего Востока, порты акватории Черного моря, железнодорожные пункты пропуска на границе с Казахстаном. Данные факторы привели:

- к росту дополнительной эксплуатационной нагрузки на «широтные» направления сети;
- дисбалансу экспорта и импорта, что в свою очередь способствовало дефициту порожних фитинговых платформ на Дальнем Востоке;
- к необходимости разработки актуальной технологии перевозки контейнеров с использованием парка полувагонов [1–3];
- к острой нехватке терминальной и железнодорожной инфраструктуры.

В расположении ПАО «ТрансКонтейнер» на Восточном полигоне железных дорог имеется восемь контейнерных терминалов. Один терминал находит-

ся на Восточно-Сибирской железной дороге (железнодорожная станция Батарейная). В границах Забайкальской железной дороги у «Трансконтейнера» в наличии сразу три крупных контейнерных терминала: Чита, Благовещенск и Забайкальск. На Дальневосточной железной дороге контейнерных терминалов также три: Первая Речка, Уссурийск и Хабаровск-2. Общая пропускная способность всех терминалов в 2024 г. составила 1,6 млн ДФЭ [7].

Проведенный анализ позволил выявить факт того, что в создавшихся условиях ПАО «ТрансКонтейнер» за период с 2020 по 2024 гг. показывало уверенный рост объемов контейнеропотока. В 2025 г. на фоне снижения транзитного контейнерного грузопотока, а также импортного, вызванного насыщением рынка автомобильной продукцией, в первую очередь, наблюдается падение объемов перевозки. Однако в рамках XV Международного контейнерного форума «ЕСЭ-2025» в Сочи руководство компании заявило: «Контейнерный рынок за последние 20 лет "падал" трижды – в 2008, 2014 гг. и сейчас. За 8 месяцев 2025 г. по сравнению с аналогичным периодом 2024-го спад составил 4,3 %». Было отмечено: «Мы наблюдаем очень осторожный оптимизм в отрасли... июнь – 127 тыс. ДФЭ в импорте, июль – 135 тыс., август – 142 тыс. В сентябре тоже видим хорошую динамику. Очень верим, что рынок идет в сторону восстановления» [8].

Необходимо отметить, что ПАО «ТрансКонтейнер» в новых условиях функционирования в рамках Восточного полигона столкнулся с рядом логистических проблем, обусловленных внешними (институциональными) факторами. Возможности компании в удовлетворении потребностей грузоотправителей в значительной степени искусственно занижены, это связано с тем, что железнодорожная инфраструктура в значительной степени перегружена и функционирует на пределах своих возможностей. Проведенный анализ показал, что такая тенденция связана, прежде всего, с переориентированием грузопотока с западного на восточное направление. В связи с данным фактом, филиалам ПАО «ТрансКонтейнер» реже согласовывают заявки на перевозки грузов в контейнерах по форме ГУ-12 в направлении пограничных переходов и портов Восточного полигона. И, как следствие, некоторые клиенты вынуждены переходить на другие виды транспорта либо к конкурентам ПАО «ТрансКонтейнер». Таким образом, компания-перевозчик, а также ОАО «РЖД» теряют прибыль, что влечет за собой уменьшение налоговых отчислений в бюджет регионов.

Согласно установленной технологии работы Восточного полигона отправление контейнерных поездов в направлении морских портов и пограничных переходов осуществляется при условии получения подтверждения организациями смежных

видов транспорта, железными дорогами иностранных государств. В случае недостаточности пропускной способности инфраструктуры железнодорожного транспорта для удовлетворения потребностей терминалов в перевозке контейнеров отправление контейнерных поездов осуществляется с учетом сохранения технологии формирования и отправления полноразмерных контейнерных поездов, требующей высокой скорости доставки. В случаях невозможности одновременного удовлетворения всех потребностей в отправлениях контейнерных поездов распределение параметров между терминалами осуществляется пропорционально их перерабатывающим способностям по погрузке в соответствии с условиями договора [11–17].

При формировании контейнерных поездов на местах общего пользования в расчете перерабатывающей способности станции отправления учитывается техническая и технологическая возможность фронтов погрузки/выгрузки контейнеров.

С целью эффективного использования инфраструктуры железнодорожного транспорта на направлениях с ограниченной пропускной способностью в течение планируемого месяца в целях восполнения недогруза из-за непредъявления к перевозке контейнерных поездов или отказа от их отправления может осуществляться дополнительное отправление контейнерных поездов по мере их предъявления от пользователей услуг железнодорожного транспорта [18–20].

Распределение параметров отправления контейнерных поездов целесообразно осуществлять на основе:

- фактических объемов контейнерных перевозок грузоотправителями в предыдущих периодах;
- перерабатывающей способности путей общего пользования, контейнерных терминалов;
- перерабатывающей способности станции отправления;
- технической и технологической возможности формирования контейнерных поездов на станциях по договору с перевозчиком;
- пропускной способности инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования, межгосударственных стыковых пунктов пропуска;
- заявляемых объемов отправления контейнерных поездов [17–21].

Таким образом, очевидно, что потенциал Восточного полигона как транзитных магистралей достаточно высок в контексте увеличения общемировых тенденций контейнерооборота, но при этом существуют и сдерживающие факторы, такие как дефицит инфраструктуры по перевозке и переработке больших объемов контейнеров.

Заключение

В заключение стоит отметить, что потенциал развития контейнерных перевозок через Восточный полигон высок, что позволит Российской Федерации занять лидирующие позиции в транзитных контейнерных перевозках между странами АТР и Европы, а также увеличить степень контейнеризации всего грузопотока в стране, так как в период кризисов существенно возрастают перевозки контейнеров во внутреннем сообщении. Важно отметить, что растет и экспорт, что приводит к снижению дисбаланса в портах и на стыках с железными дорогами другой ширины колеи, что, в свою очередь, может привести к возникновению обратного

дисбаланса. В рамках действующего дефицита железнодорожной инфраструктуры, переориентации российского грузопотока с западного на восточное направление, реализовать эти возможности в полной мере будет проблематично. ПАО «ТрансКонтейнер», являющееся крупнейшим оператором контейнерной логистики в стране, ощущает те изменения, в которых оказалась отрасль, и сталкивается со сложностями в отправке грузов на восточное направление в связи с перегруженностью железнодорожной инфраструктуры, из-за чего некоторые клиенты вынуждены искать альтернативные способы доставки своих грузов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ОАО «РЖД» : офиц. сайт. URL : <https://cargo.rzd.ru/ru/11680/page/103290?id=21100> (дата обращения: 04.10.2025).
2. Контейнеры станут «умными» // ОАО «РЖД» : офиц. сайт. URL : <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=223117> (дата обращения: 05.10.2025).
3. Васильев Д.В. Повышение эффективности терминальной обработки и организации контейнерных поездов : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Самара, 2023. 143 с.
4. Новая перевозочная. URL : <https://www.npktrans.ru/media/novosti/perevozki-konteinerov-po-seti-rzhd-v-2025-g-mogut-dostich-8-mln-teu-iert/> (дата обращения: 05.10.2025).
5. Контейнеры тормозят спрос // Коммерсантъ. URL : <https://www.kommersant.ru/doc/7753691> (дата обращения: 05.10.2025).
6. Ли Т.Е. Развитие подсистем транспортных узлов Республики Корея в условиях роста контейнеропотока : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Хабаровск, 2023. 162 с.
7. ТрансКонтейнер : офиц. сайт. URL : <https://trcont.com/> (дата обращения: 05.10.2025).
8. Логистика без галстуков/Форумы ЕСЭ // ВКонтакте. URL : https://vk.com/wall-120965508_617 (дата обращения: 05.10.2025).
9. Железнов Д.В., Никищенко С.А. Инновационная технология в организации железнодорожных контейнерных перевозок // Транспортное дело России. 2024. № 7. С. 101–103.
10. Банщиков А.В., Железнов Д.В. Развитие контейнерного рынка России // Наука 1520 ВНИИЖТ: загляни за горизонт : II Международная конференция : сборник материалов конференции, Москва, 24–25 августа 2023 г. – Москва : АО «Научно-исследовательский институт транспорта» (ВНИИЖТ), 2023.
11. Изотов Д.А. Региональный аспект экономической интеграции России в АТР: оценка потенциала и эффектов (на примере российского Дальнего Востока) : диссертация на соискание ученой степени доктора экономических наук. Хабаровск, 2021. 278 с.
12. Власова Н.В., Брытков В.С. Вопросы развития транспортно-логистического бизнес-блока в условиях роста грузопотока // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2025. № 1(42). С. 19–27.
13. Оленцевич В.А., Горшков В.В., Брытков В.С. Современное состояние и проблемы развития транспортно-логистической системы России // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 1(81). С. 103–112.
14. Москвичев О.В. Повышение эффективности терминальной обработки и организации контейнерных поездов : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Самара, 2023. 143 с.
15. Янченко А.А. Методическое обеспечение совершенствования управления импортным контейнерным потоком в условиях свободного порта Владивосток : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Владивосток, 2019. 198 с.
16. Перминова А.А. Прогнозирование спроса и оценка конкурентоспособности контейнерных перевозок на железных дорогах России : диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук. Москва, 2016. 139 с.
17. Баккал В.М. Трансформация процесса управления контейнерным парком в условиях санкционных ограничений // Инновационные бизнес-процессы в менеджменте ОАО «Российские железные дороги»: развитие управленческого инструментария / под ред. О.В. Ефимовой, Е.Б. Бабошина. Москва : Прометей, 2023. С. 264–269.
18. Трапенов В.В. Формирование узловой сети грузовых распределительных терминалов на принципах мультиагентного экономико-географического размещения : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Ростов-на-Дону, 2024. 264 с.
19. Развитие узловой терминально-складской инфраструктуры: модификация методов исследования и прогнозы / О.Н. Числов, В.А. Богачев, В.В. Трапенов [и др.] // Бюллетень результатов научных исследований. 2023. № 3. С. 46–57.
20. Халын В.Г. Развитие логистических систем распределения на основе активизации транзитного потенциала ЮФО : диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук. Ростов-на-Дону, 2020. 279 с.
21. Изотов Д.А., Тошков К.И. Оценка потенциала расширения торговых взаимодействий регионов Дальнего Востока со странами АТР // Регионалистика. 2019. Т. 6, № 5. С. 6–30.

REFERENCES

1. ОАО «RZhD» : ofits. sait [JSC Russian Railways: official website]. URL : <https://cargo.rzd.ru/ru/11680/page/103290?id=21100> (data obrashcheniya: 04.10.2025)
2. Kontejnery stanut «umnymi» [Containers will become «smart»] // ОАО «RZhD» : ofits. sait. URL : <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=223117> (data obrashcheniya: 05.10.2025)

3. Vasilyev D.V. Povyshenie effektivnosti terminal'noj obrabotki i organizatsii kontejnerykh poezdov [Improving the efficiency of terminal processing and the organization of container trains] : dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. Samara, 2023. 143 s.
4. Novaya perevozchnaya [New transportation]. URL : <https://www.npktrans.ru/media/novosti/perevozki-konteinerov-po-seti-rzhd-v-2025-g-mogut-dostich-8-mln-teu-iert/> (data obrashcheniya: 05.10.2025)
5. Kontejnery tormozyat spros [Containers slow down the demand] // Kommersant. URL : <https://www.kommersant.ru/doc/7753691> (data obrashcheniya: 05.10.2025)
6. Lee T.E. Razvitie podsistem transportnykh uzlov Respubliki Koreya v usloviyakh rosta gruzopotoka [Development of transport hub subsystems in the Republic of Korea in the context of growing container traffic] : dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. Khabarovsk, 2023. 162 s.
7. TransContainer : ofits. sait [TransContainer : official website]. Moscow. URL: <https://trcont.com/> (data obrashcheniya 05.10.2025)
8. Logistika bez galstukov/Forumy ESE [Logistics without ties/ESE Forums] // Vkontakte. URL : https://vk.com/wall-120965508_617 (data obrashcheniya: 05.10.2025)
9. Zheleznov D.V., Nikishchenkov S.A. Innovatsionnaya tekhnologiya v organizatsii zheleznodorozhnykh kontejnerykh perevozok [Innovative technology in the organization of railway container transportation] // Transportnoe delo Rossii. 2024. № 7. Pp. 101–103.
10. Banshchikov A.V., Zheleznov D.V. Razvitie kontejnernogo rynka Rossii [Development of the Russian container market] // Nauka 1520 VNIIZhT: zaglyani za gorizont : II Mezhdunarodnaya konferentsiya : sbornik materialov konferentsii, Moskva 24–25 avgusta, 2023. Moscow, JSC «Research Institute of Transport» (VNIIZhT), 2023.
11. Regional'ny aspekt ekonomicheskoy integratsii Rossii v ATR: otsenka potentsiala i effektivov (na primere rossijskogo Dal'nego Vostoka): [Regional aspect of Russia's economic integration in the Asia-Pacific region: assessment of potential and effects (based on the example of the Russian Far East)]: dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. Khabarovsk, 2021. 278 s.
12. Vlasova N.V., Brytkov V.S. Voprosy razvitiya transportno-logisticheskogo biznes-bloka v usloviyakh rosta gruzopotoka [Issues of development of the transport and logistics business block in the conditions of growth of cargo traffic] / N. V. Vlasova, V. S. // Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona. 2025. № 1(42). S. 19–27.
13. Olentsevich V.A., Gorshkov V.V., Brytkov V.S. Sovremennoe sostoyaniye i problemy razvitiya transportno-logisticheskoy sistemy Rossii [The current state and problems of development of the transport and logistics system of Russia] // Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie. 2024. № 1(81). S. 103–112.
14. Moskvichev O.V. Povyshenie effektivnosti terminal'noj obrabotki i organizatsii kontejnerykh poezdov [Improving the efficiency of terminal processing and the organization of container trains] : dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. Samara, 2023. 143 s.
15. Yanchenko A.A. Metodicheskoe obespechenie sovershenstvovaniya upravleniya importnym kontejnerym potokom v usloviyakh svobodnogo porta Vladivostok [Methodological support for improving the management of imported container traffic in the free port of Vladivostok] : dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. Vladivostok, 2019. 198 s.
16. Perminova A.A. Prognozirovaniye sprosa i otsenka konkurentosposobnosti kontejnerykh perevozok na zheleznykh dorogakh Rossii [Forecasting demand and assessing the competitiveness of container transportation on Russian railways]: dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata ekonomicheskikh nauk. Moskva, 2016. 139 s.
17. Bakal V.M. Transformatsiya protsessa upravleniya kontejnerym parkom v usloviyakh sanktsionnykh ogranichenij [Transformation of the container fleet management process under sanctions restrictions] // Innovatsionnye biznes-protsessy v menedzhmente OAO «Rossijskie zheleznye dorogi»: razvitie upravlencheskogo instrumentariya / pod red. O.V. Efimovoj, E.B. Baboshina. Moskva : Prometej, 2023. S. 264–269.
18. Trapenov V.V. Formirovaniye uzlovoj seti gruzovykh raspreditel'nykh terminalov na printsipakh mul'tiagentnogo ekonomiko-geograficheskogo razmeshcheniya [Formation of a node network of cargo distribution terminals based on the principles of multi-agent economic and geographical placement] : dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. Rostov-na-Donu, 2024. 264 s.
19. Razvitie uzlovoj terminal'no-skladskoj infrastruktury: modifikatsiya metodov issledovaniya i prognozy [Development of terminal and warehouse infrastructure: modification of research methods and forecasts / O.N. Chislov, V.A. Bogachev, V.V. Trapenov [et al.] // Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy. 2023. № 3. S. 46–57.
20. Khalyin V.G. Razvitie logisticheskikh system raspredeleniya na osnove aktivizatsii tranzitnogo potentsiala YuFO [Development of logistics distribution systems based on the activation of the transit potential of the Southern Federal District]: dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni doktora ekonomicheskikh nauk. Rostov-na-Donu, 2020. 279 s.
21. Izotov D.A., Toshkov K.I. Otsenka potentsiala rasshireniya torgovykh vzaimodejstvij regionov Dal'nego Vostoka so stranami ATR [Assessment of the potential for expanding trade interactions between the regions of the Russian Far East and the countries of the Asia-Pacific Region] // Regionalitika. 2019. T. 6. № 5. S. 6–30.

Информация об авторе

В.С. Брытков – аспирант Иркутского государственного университета путей сообщения.

Information about the author

V.S. Brytkov – Post-graduate Student, Irkutsk State Transport University.

Статья поступила в редакцию 14.10.2025; одобрена после рецензирования 08.11.2025; принята к публикации 08.11.2025.
The article was submitted: 14.10.2025; approved after reviewing: 08.11.2025; accepted for publication: 08.11.2025.

Научная статья
УДК 625 (075.8)
doi:10.31079/2415-8658-2025-4-33-40

СЕЗОННОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОЕЗДОВ НА ГРУНТЫ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА НА УЧАСТКЕ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЙ ДИРЕКЦИИ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Данильянц Елена Сергеевна¹, Пупатенко Виктор Викторович²

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

¹ danilyanc_elena@mail.ru

² pvv@festu.khv.ru

Аннотация. Представлен анализ экспериментального исследования, выполненного на участке ДВОСТЖД. Период проведения экспериментов соответствовал годовому циклу изменения температур грунтов земляного полотна – от начала процесса весеннего оттаивания до промерзания в зимний период. В результате обработки исходных данных получены закономерности изменения амплитуд виброскоростей по поперечному профилю земляного полотна. Дополнительно на основе быстрого преобразования Фурье рассчитаны спектры колебаний в точках по откосу железнодорожного земляного полотна. Построены закономерности изменения воздействия подвижного состава с наибольшей осевой нагрузкой в годовом цикле наблюдения, определён расчётный уровень его вибродинамического воздействия на грунты земляного полотна. Выполнен анализ изменения амплитуд виброскоростей в направлении от оси пути, построена зависимость коэффициента затухания колебаний в зависимости от частоты. Полученные результаты являются исходными данными для создания адекватной модели железнодорожной насыпи с учётом динамики в расчётах конструкций земляного полотна численными методами.

Ключевые слова: железнодорожное земляное полотно, виброскорости, затухание колебаний, спектр колебаний, параметры колебаний грунтов

Original article

SEASONAL VARIATIONS IN THE IMPACT OF TRAINS ON THE EARTH BED SOILS ON THE DVDI SECTION

Daniliants Elena S.¹, Pupatenko Victor V.²

^{1,2} Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia

¹ danilyanc_elena@mail.ru

² pvv@festu.khv.ru

Abstract. The article presents an analysis of an experimental study performed on a section of the Far Eastern Railroad. The period of the experiments corresponded to the annual cycle of changes in soil temperatures of the earth bed – from the beginning of the spring thawing process to freezing in winter. By processing the initial data, patterns of changes in vibration velocity amplitudes along the transverse profile of the earth bed were obtained. Additionally, on the basis of the fast Fourier transform, oscillation spectra were obtained at points along the slope of the railroad earth bed. Patterns of changes in the impact of rolling stock with the highest axial load in the annual observation cycle are constructed, and the calculated level of its vibro-dynamic effect on the soils of the earth bed is determined. The analysis of the variation of vibration velocity amplitudes in the direction from the axis of the path is performed, and the dependence of the vibration attenuation coefficient on the frequency is constructed. The results obtained are the initial data for creating an adequate model of a railway embankment, taking into account the dynamics in calculations of earth bed structures using numerical methods.

Keywords: Railroad earth bed, vibration velocities, vibration attenuation, vibration spectrum, soil vibration parameters

В настоящее время на сети дорог действует «Инструкция по диагностике и мониторингу земляного полотна ОАО «РЖД» [1], утвержденная распоряжением № 2078/р от 29.08.2024 г. Она определяет систему диагностики и мониторинга земляного полотна железнодорожного пути на инфраструктуре железнодорожного транспорта общего пользования. На основе этой инструкции планируются работы по содержанию, ремонту и усилению земляного полотна. В инструкцию, помимо прочих,

включены требования к вибродиагностике, что является логичным результатом работ российских и советских ученых, изучавших ранее параметры колебательного процесса грунтов железнодорожного земляного полотна [2–5 и др.]. Намеренно приведены ссылки только на обзорную монографию и диссертационные работы, так как в них достаточно подробно изложена история исследований в области вибродиагностики.

Актуальность работы вызвана тем, что на дорогах Восточного полигона за последние годы существенно изменились эксплуатационные условия: увеличиваются осевые нагрузки вагонов и локомотивов, значительно возросли весовые нормы поездов. Организовано движение тяжеловесных и сдвоенных составов. Кроме того, практически по всему главному ходу ДВДИ уложена бесстыковая конструкция пути на железобетонных шпалах.

Этими обстоятельствами определяется **цель выполнения работы**: на основе экспериментальных данных уточнить параметры вибрационного воздействия подвижного состава на грунты земляного полотна.

Аппаратура, применяемая в исследованиях колебаний, передающихся от подвижного состава на грунты земляного полотна, постоянно развивается [6–8, 14, 19]. В наших экспериментах использован аппаратный комплекс «Сейсмолог–Тензо», который позволяет выполнять регистрацию аналогового сигнала в цифровом представлении с помощью универсального контроллера на основе 24-битных сигма-дельта аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Технические данные АЦП: количество каналов – 8, коэффициент усиления предварительных усилителей – 10–100, величина минимального сигнала – 2 мкВ, величина максимального сигнала – 2000 мкВ, периоды дискретизации – 0,5, 1,0, 2,0, 8,0, 32,0 мс. Для регистрации сигнала применялись геофоны GS-20DX SUPER со следующими характеристиками: собственная частота – 10 Гц, достоверный частотный диапазон – 7–500 Гц, верхний предел частоты пропускания – 250 Гц, сопротивление катушки – 395 Ом, гармонические искажения, замеренные при частоте 12 Гц, < 0,1 %, степень затухания с шунтом 1 кОм – 0,70, чувствительность – 27,6 В/м/с, чувствительность с шунтом 1 кОм – 19,7 В/м/с, постоянная затухания – 549,4.

Регистрация сигнала аппаратурой производится в милливольтках. Полученный сигнал пересчитан в вольты по формуле

$$U = u \cdot 0,05/2^{24}, \quad (1)$$

где u – величина зарегистрированного сигнала, мВ.

Значение виброскорости колебания рассчитано как отношение значения сигнала в вольтках к тарифовочному коэффициенту, который определен по графику (рис. 1) по кривой С.

Для сигнала, зарегистрированного в частотном диапазоне 7–20 Гц, виброскорость колебания грунта определяется

$$v = U / (0,0074 f^3 - 0,3691 f^2 + 6,4104 f - 19,7); \quad (2)$$

– для сигнала с частотой более 20 Гц

$$v = U / 19,7. \quad (3)$$

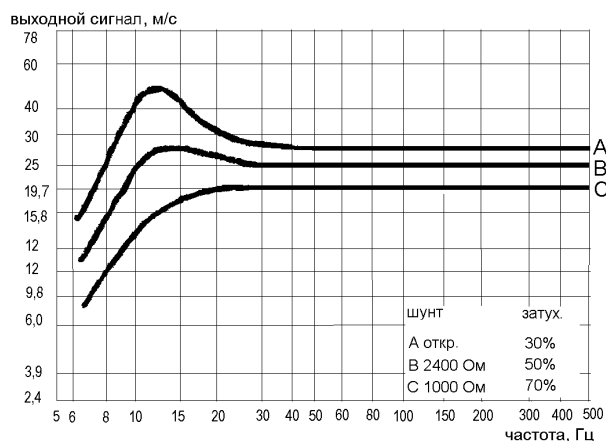


Рис. 1. График для определения тарифовочного коэффициента

Аппаратура дает возможность регистрировать колебания с частотой до 512 Гц. Обработка записей позволила определить, что 90 % площади виброспектра находится в частотном диапазоне от 0 до 62,5 Гц, 10 % – 62,5–512 Гц и собственные колебания геофонов составляют 10 Гц [4, 11]. На основе этого анализа принято выполнять обработку результатов в частотном диапазоне спектра колебаний 10–62,5 Гц.

Объектом исследования на участке ДВДИ (ПЧ 5) выбрана насыпь высотой 9,8 м, грунт насыпи – суглинок. Участок пути расположен в черте города Хабаровска, что было важно для организации экспериментов. Движение грузовых поездов осуществлялось со скоростью до 40 км/ч, пассажирских – до 60 км/ч.

Вертикальные колебания измерялись при проходе по участку полувагонов с углем со скоростью 40 км/ч в течение всего теплого времени года (с мая по ноябрь). В год измерений наблюдалась холодная весна с затяжным периодом оттаивания сезонно-мерзлого грунта. Лето было жарким и засушливым, с редким периодом ливневых дождей. Осенью в середине октября ночью наблюдались отрицательные температуры. В ноябре, когда выполнялись последние измерения, верхний слой грунта насыпи замёрз. В течение всего этого времени состояние грунтов значительно менялось: их влажность, температура, твердое и талое состояние.

Геофоны устанавливались на откосе насыпи (рис. 2).

Обработка результатов измерений выполнялась по программе «AVE» (авторы Я.В. Пажнецев, В.В. Пупатенко). Абсолютные значения амплитуд виброскоростей приводились к максимальному уровню, зарегистрированному для конкретного геофона, установленного на определённой стоянке за весь период наблюдений. Таким образом, удалось установить общую зависимость уровня колебаний, принимая за 1 максимальную амплитуду, зарегистрированную в годовом цикле. Итог расшифровки по всем восьми датчикам за весь период наблюдений приведен на рис. 3.

СЕЗОННОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОЕЗДОВ НА ГРУНТЫ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА
НА УЧАСТКЕ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЙ ДИРЕКЦИИ ИНФРАСТРУКТУРЫ

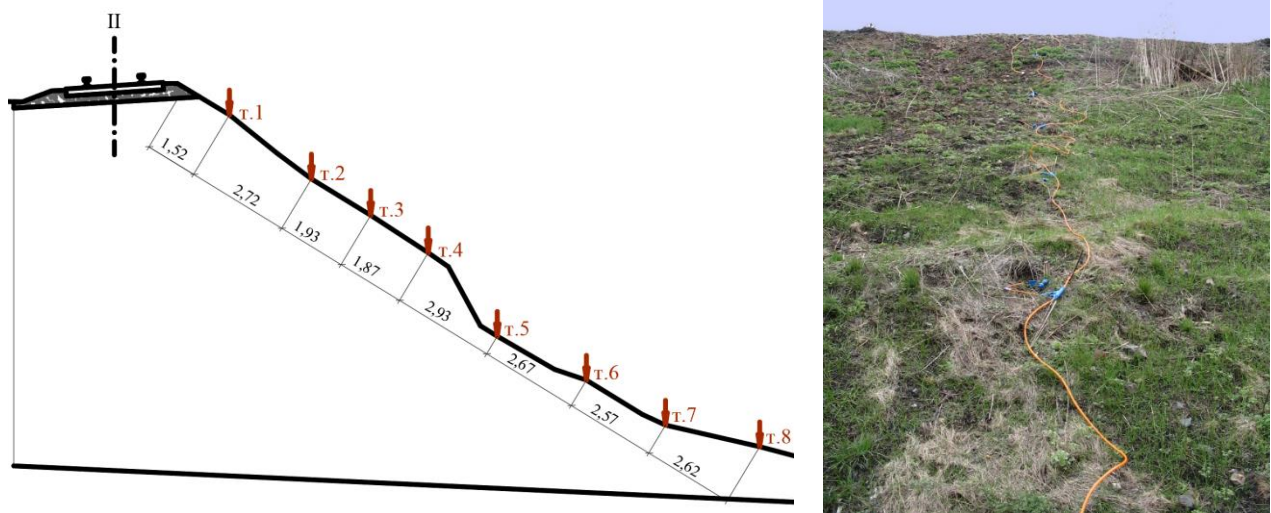


Рис. 2. Поперечный профиль насыпи. Точки измерения колебаний т. 1 – т. 8 и фотография места расстановки геофонов по откосу

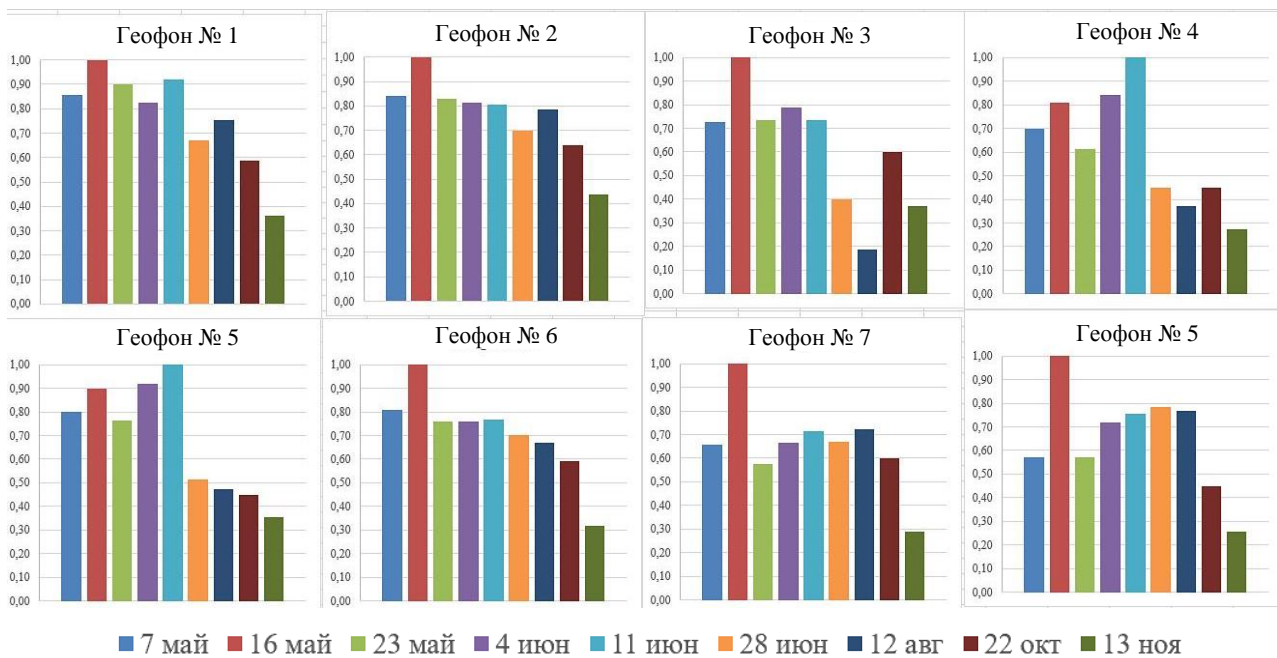


Рис. 3. Относительный уровень колебаний, измеренный в точках 1–8 в годовом цикле наблюдения

Анализ данных рис. 3 позволил установить общую зависимость уровня колебаний за сезон измерений: максимальный уровень виброскоростей для всех датчиков (за исключением геофонов № 4 и № 5, к анализу которых вернёмся чуть позже) зарегистрирован в самом начале процесса оттаивания поверхностных слоёв грунта земляного полотна. Откос насыпи ориентирован на юг, поверхность земляного полотна в зоне обочины и бровки освобождается от снежного покрова и оттаивает в первую очередь. Оттаявший слой до 1–1,5 м глубиной лежит на слое сезонно-мёрзлого грунта. При понижении границы оттаивания до уровня суглинистых грунтов тела земляного полотна их влажность резко увеличивается,

снижаются расчетные параметры (угол внутреннего трения и коэффициент сцепления), определяющие коэффициент устойчивости [9].

Как ранее установлено [2, 10], именно на границе этих слоёв происходит резкое увеличение амплитуд колебаний не только виброскоростей, но, в первую очередь, виброперемещений и виброускорений. Аналогичные процессы выявлены учеными Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. акад. Н.П. Лаверова УрО РАН [11] и теоретически обоснованы И.П. Добровольским [12] (Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН) на основе принятой им модели упругой среды, т.е. типичные железнодорожные насыпи можно мо-

делировать упругим полупространством для усилий, определяемых весом проходящего поезда. Эти работы позволили связать амплитуды виброскоростей, зарегистрированных при проходе поездов, с характеристиками грунтов земляного полотна (коэффициент Пуассона, модуль сдвига) и параметрами подвижного состава (скорость движения и осевая нагрузка).

На рис. 3 представлены данные, зарегистрированные при проходе полувагонов с углем со скоростью 40 км/ч. Таким образом, единственный параметр, изменявшийся по времени проведения экспериментов, связан с состоянием грунтов. При постепенном протаивании сезонно-мёрзлого слоя относительные амплитуды в каждой точке измерения снижаются до 0,4–0,35, а у подошвы откоса – до 0,25. По данным [12] можно показать изменение модуля сдвига грунта в таких же пределах. Данное заключение можно сделать только в одном случае: земляное полотно не имеет пластических деформаций, и грунты, его слагающие, работают практически в упругой стадии.

Очевиден первый вывод: опасность потери устойчивости верхнего слоя длительно эксплуатируемого земляного полотна, имеющего в своём сложении балластные накопления в зоне основной площадки, на обочине и на откосах, возникает именно в этот период – во время протаивания верхнего слоя на глубину около 1 м.

Второй вывод по рис. 3 можно сделать на основе анализа ранее пропущенных датчиков, установленных на стоянках 4 и 5. Как понятно из рис. 2, эти точки связаны с подошвой откоса балластного шлейфа, подвижки которого активизируются при обводнении границы балластных накоплений с суглинком тела насыпи.

Для выбранного объекта проведения экспериментов ранее сотрудниками ДВГУПС были проведены работы по инженерно-геологическому обследованию, динамическому и сейсмо-томографическому зондированию, георадарное профилирование участков [15]. Установлено наиболее вероятное положение поверхности смещения балластного шлейфа по верхним слоям суглинистых грунтов тела земляного полотна. Также выполнены прогнозные расчеты устойчивости откосов и анализ накопления остаточных деформаций в «ядре» тела насыпи, т.е. в зоне под основной площадкой [9].

Третий вывод можно сделать, анализируя общее снижение уровня вибрационного воздействия начиная с весны до начала осенне-зимнего промерзания. Предельные уровни амплитуд виброскоростей в зоне бровки откоса земляного полотна определяются нормами ОАО «РЖД» [1], некоторые из нормируемых параметров приведены в табл. 1. Для определения заявленных предельных параметров недостаточно выполнить замеры фактических амплитуд нормируемого параметра, необходимо

перейти к амплитудно-частотному анализу измененного сигнала. Возможность и необходимость применения FFT (быстрого преобразования Фурье) для оценки объектов инфраструктуры доказана неоднократно [17–19].

Таблица 1

Нормы пороговых значений критических параметров для высоких насыпей [1]

Параметр	Ед. изм.	Норма порогового значения для линии				
		ВС	С	О	I–II	III
Коэффициент устойчивости	доли ед.	1,20	1,15	1,15	1,10	1,05
Наличие трещин на обочине или на откосе	–	да	да	да	да	да
Амплитуда виброскорости на бровке насыпи	мм/с	10	10	15	20	30
Коэффициент затухания колебаний по откосу насыпи	доли ед.	0,25	0,20	0,20	0,20	0,10
Интенсивность колебаний в полосе 0,1–10 Гц	%	20	25	25	30	50

В качестве пояснений к табл. 1 следует указать, что амплитуда виброскорости на бровке насыпи определяется в ходе вибродиагностики как действующая амплитуда полного вектора виброскорости на бровке насыпи; коэффициент затухания колебаний по откосу насыпи – как затухание на метре длины откоса виброскорости у подошвы насыпи; интенсивность колебаний в полосе 10 Гц – как доля низкочастотных колебаний в диапазоне от 0,1–10 Гц.

Таким образом, при выполнении работ по вибродиагностике в любое время теплого сезона в обязательном порядке необходимо переводить фактически измеренные амплитуды виброскоростей к уровню, соответствующему самому неблагоприятному периоду – началу весеннего оттаивания. Данные рис. 3 позволяют учесть время выполнения работ, для учета различий фактического положения рабочего сечения по откосу земляного полотна уровень воздействия при удалении от оси пути необходимо также привести к уровню на бровке. Для этого данные обработки экспериментальных измерений перестроены в координатных осях «относительный уровень амплитуд виброперемещений – расстояние от оси пути», которое увязано с местом положения датчиков (рис. 4).

Для анализа выбраны только три периода проведения экспериментов: 1) весенний, когда глубина оттаивания составила 80 см; 2) летний, когда последние две недели не было дождей, и температура воздуха составляла до +30 °С; 3) поздняя осень с отрицательными ночными температурами до –10 °С. Следует отметить, что в соответствии с требованиями [1] к анализу принимаются только выделенные частот-

СЕЗОННОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПЕЗДОВ НА ГРУНТЫ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА
НА УЧАСТКЕ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЙ ДИРЕКЦИИ ИНФРАСТРУКТУРЫ

ные диапазоны колебаний, например 10 Гц, и в этом случае необходимо привести максимальный уровень виброперемещений измеренного диапазона частот к заданному диапазону. Принятый частотный спектр разбит на 5 поддиапазонов (рис. 4). Для начала процесса протаивания установлены близкие к экспоненте зависимости уровня колебаний при удалении от оси пути, что хорошо согласуется с результатами ранее выполненных работ [2–5].

Наибольшие значения амплитуд зарегистрированы в среднем частотном диапазоне 30–40 Гц

и 20–30 Гц. Наиболее важный с точки зрения энергетического воздействия низкочастотный диапазон 10–20 Гц определяет уровень амплитуд до 40 % от максимального. С удалением от оси пути до подшвы насыпи амплитуды виброскоростей снижаются в 4–10 раз. Сотрудниками ДВГУПС ранее [2] выявлен факт пикового увеличения амплитуд виброперемещений в период начала оттаивания. Этот факт подтверждается наличием пика амплитуд виброскоростей (рис. 4, а) для точки 3.

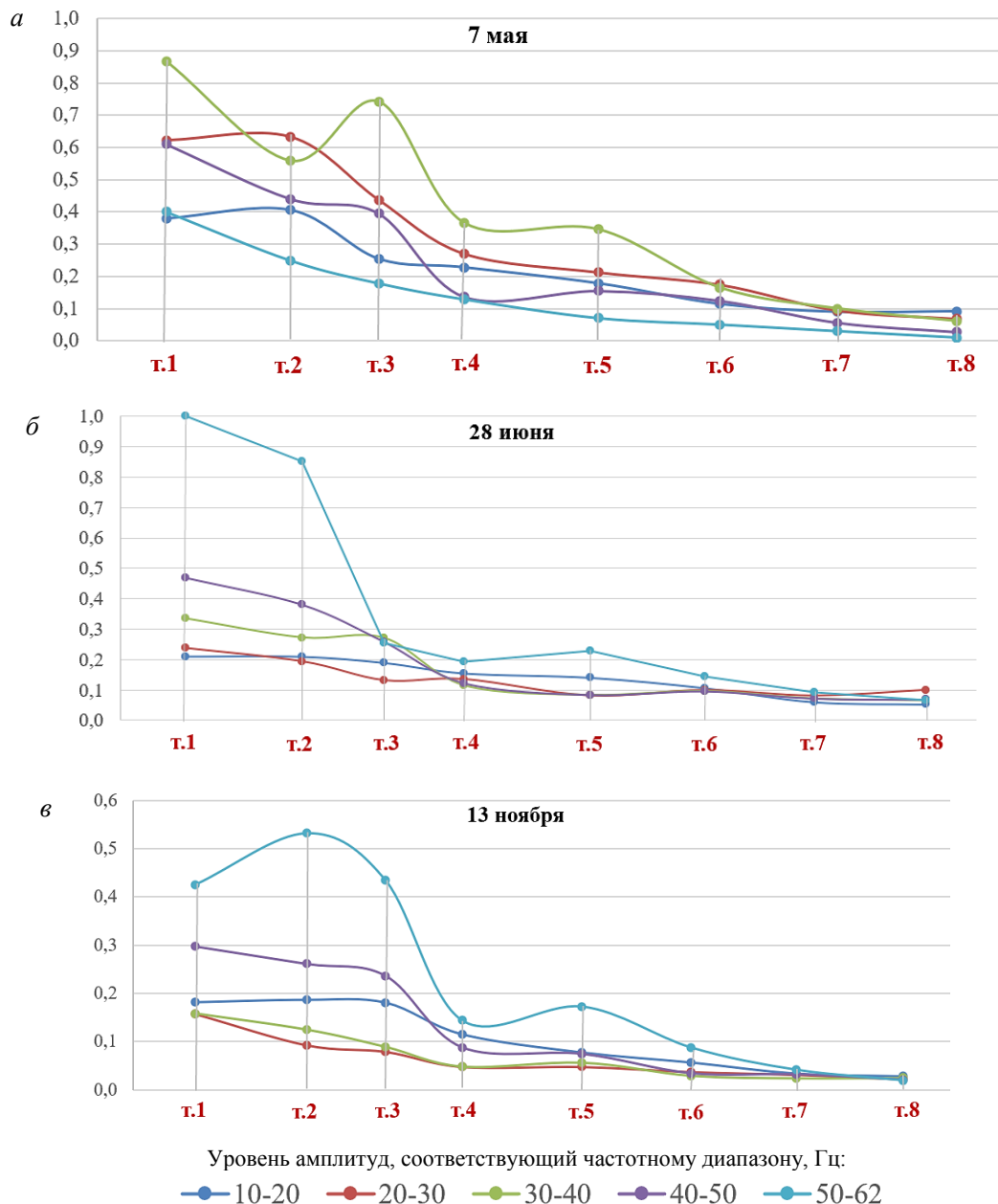


Рис. 4. Сравнение относительного уровня колебаний при удалении от оси пути, доли единицы (за 1 единицу принят максимальный уровень воздействия 28 июня): а – 7 мая; б – 28 июня; в – 13 ноября

SEASONAL VARIATIONS IN THE IMPACT OF TRAINS ON THE EARTHBED SOILS ON THE DVDI SECTION

Для практического применения результатов выполнена статистическая обработка экспериментально полученных данных, аппроксимация их зависимостями экспоненциально вида, а для случаев, когда корреляция недостаточна, – квадратной параболой (табл. 2).

Установлено, что для периода от начала оттаивания до наступления первых заморозков экспонентой хорошо аппроксимируются все зависимости величины амплитуд виброскоростей (параметр y) от расстояния (параметр x). Исключение представляет период начала промерзания (13 ноября), когда промёрзший поверхностный слой изменяет общий характер распространения колебаний от подвижного состава. В этом случае зависимость описана квадратной параболой с коэффициентами корреляции от 0,918 до 0,963.

Колебания различной частоты распространяются в грунтовой среде по-разному, применяемый в [1] «коэффициент затухания» должен относиться к конкретному частотному диапазону – около 10 Гц. Рассчитана зависимость коэффициента затухания для колебаний различной частоты (рис. 5), для выделенных ранее пяти поддиапазонов.

Результаты, представленные на рис. 5, позволяют сделать вывод о практически идентичном характере амплитуд виброскорости во всем зафиксированном частотном диапазоне 1–62,5 Гц. Следует отметить, что выбранные даты – от 7 мая до 28 июня соответствуют началу и завершению процесса оттаивания в регионе проведения экспериментов. Как правило, протаивание грунтов земляного полотна завершается к началу июля, т.е. эта зависимость применима ко всему весенне-летнему периоду. Частота колебаний влияет на коэффициент затухания значительно, с увеличением частоты от 10 до 62,5 Гц коэффициент затухания увеличивается практически в 2 раза. Нормируемое значение [1] для колебаний частотой 10 Гц не превышено за весь теплый период.

Можно сделать вывод о полном соответствии объекта исследования предельным требованиям нормативных документов [1]. При планировании экспериментов выбирался объект земляного полотна, не подверженный каким-либо деформациям и соответственно не находящийся на учете как деформирующийся или дефектный.

Таблица 2

Результаты аппроксимации зависимостей затухания при удалении от оси пути для выделенных частотных диапазонов

Частотный диапазон, Гц	Дата измерения		
	7 мая	28 июня	13 ноября
10–20	$y = 0,46 e^{-0,092 x}$	$y = 0,2962 e^{-0,087 x}$	$y = 0,0001 x^2 - 0,0131 x + 0,2231$ $R^2 = 0,9222$
20–30	$y = 0,7 e^{-0,114 x}$	$y = 0,5 e^{-0,12 x}$	$y = 0,0006 x^2 - 0,0187 x + 0,1729$ $R^2 = 0,9487$
30–40	$y = e^{-0,133 x}$	$y = 0,5 e^{-0,125 x}$	$y = 0,0006 x^2 - 0,0198 x + 0,1887$ $R^2 = 0,9627$
40–50	$y = 0,8712 e^{-0,17 x}$	$y = e^{-0,174 x}$	$y = 0,001 x^2 - 0,0385 x + 0,3804$ $R^2 = 0,9239$
50–62	$y = 0,6061 e^{-0,199 x}$	$y = 1,5 e^{-0,178 x}$	$y = -8E - 05 x^4 + 0,0037 x^3 - 0,0526 x^2 + 0,239 x + 0,1827$ $R^2 = 0,9184$

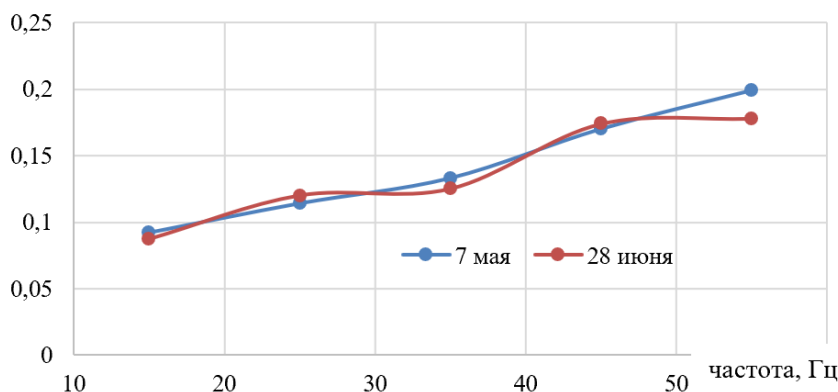


Рис. 5. Зависимость коэффициента затухания амплитуд виброскорости от частоты для экспериментов, выполненных 7 мая и 28 июня

Главные итоги работы состоят в получении новых экспериментальных данных, а на основе их обработки – в построении зависимостей, формализующих и облегчающих использование результатов практических работ по вибродиагностике железнодорожных насыпей, подтверждающих невозможность и нецелесообразность проведения длительных, подробных и тщательных экспериментов на конкретных объектах инфраструктуры. Показана возможность приведения измеренных при выполнении вибродиагностики параметров к виду, при-

годному для сопоставления с требованиями действующей нормативной документации.

Дальнейшее направление исследований связано, в первую очередь, с расширением не только измерения, но и анализа всех параметров колебательного процесса – виброускорений, виброскоростей, виброперемещений (и их производных) с целью качественного диагностирования и обоснованной оценки по предельным параметрам состояния обследуемого объекта железнодорожной инфраструктуры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Инструкция по диагностике и мониторингу земляного полотна ОАО «РЖД» : [утв. № 2078/р от 29.08.2024 г.].
2. Стоянович Г.М. Натурное изучение величины вибродинамического воздействия подвижной нагрузки на грунты : монография. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2005. 147 с. EDN: QNSRMD.
3. Петряев А.В. Механическая стабилизация грунтов подпального основания геосинтетическими материалами : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. 2023. 284 с. EDN: ZBVWQX.
4. Данильянц Е.С. Прогноз напряженно-деформированного состояния железнодорожного земляного полотна с учетом вибродинамического воздействия поездов : специальность 05.22.06 «Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Хабаровск, 2009. 149 с. EDN: NQJCJZ.
5. Пупатенко В.В. Прочность земляного полотна узкоколейных железных дорог при воздействии общесетевого подвижного состава (в условиях Сахалинской железной дороги) : специальность 05.22.06 «Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург, 1993. 24 с. EDN: ZJOETN.
6. Antonovskaya G.N., Orlova I.P., Kapustian N.K. Ultralow-frequency seismic sounding of railway subgrade state by passing trains // Canadian Geotechnical Journal. 2022. Vol. 59, № 12. P. 2151–2162. EDN EJLYZD. doi:10.1139/cgj-2021-0621
7. Kapustian N.K., Antonovskaya G.N., Orlova I.P. Soil State Testing Using Heavy Vehicle Vibrations // Energies. 2022. Vol. 15, № 3. EDN: FAYNMG. doi:10.3390/en15030830
8. Опыт регистрации и обработки результатов измерения трех компонент колебаний грунтов железнодорожного земляного полотна / В.В. Пупатенко, К.В. Пупатенко, Г.П. Соколов, В.А. Шабалин // Проектирование развития транспортной сети Дальнего Востока. 2022. № 10. С. 5–13. EDN: JGWVVC.
9. Данильянц Е.С., Пупатенко В.В. Сезонное изменение устойчивости откосов насыпей // Путь и путевое хозяйство. 2007. № 10. С. 17–19. EDN: IBOGQT.
10. Стоянович Г.М., Пупатенко В.В. Распространение колебаний в железнодорожном земляном полотне при оттаивании сезонно-мерзлых грунтов в условиях глубокого промерзания // Второй Международный симпозиум земляного полотна в холодных регионах : материалы симпозиума, Новосибирск, 24–26 сентября 2015 г. / под ред. А.Л. Исакова и Ц.К. Лю. Новосибирск : Сибирский государственный университет путей сообщения, 2015. С. 71–78. EDN: VJJBAT.
11. Пупатенко В.В., Паженцев Я.В. Распределение плотности в объемной модели железнодорожного земляного полотна // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2011. № 1(41). С. 153–159. EDN: NUCJBJ.
12. Антоновская Г.Н., Капустян Н.К. Расширение возможностей метода вибродиагностики для мониторинга земляного полотна // Путь и путевое хозяйство. 2024. № 12. С. 13–16. EDN: FRBYUC.
13. Добровольский, И.П. Методика определения модуля сдвига материала железнодорожной насыпи // Вопросы инженерной сейсмологии. 2023. Т. 50, № 1. С. 84–88. EDN: LFGPMX. doi:10.21455/VIS2023.1-6
14. Система Noise-контроля технического состояния железнодорожных мостов и туннелей в сейсмоактивных регионах / Т.А. Алиев, Т.А. Бабаев, Т.А. Ализаде [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. 2021. Т. 22, № 5. С. 237–245. EDN: HGAXMO. doi:10.17587/mau.22.237-245
15. Пупатенко В.В., Пупатенко К.В., Соколов Г.П. Формирование модели насыпи на основе результатов обследования геофизическими и традиционными методами // Проектирование развития региональной сети железных дорог. 2021. № 9. С. 90–98. EDN: AALHEV.
16. Petriaev A. Vibration impact of trains on thawed soil subgrade // Journal of Chang'an University. 2017. Vol. 37, № 4. P. 18–24. EDN: XOJMRE.
17. Курбацкий Е.Н., Пестрякова Е.А., Харитонов С.С. Соотношения между амплитудными спектрами Фурье и спектрами максимальных реакций (спектрами ответов) на землетрясения // Строительство и реконструкция. 2020. № 1(87). С. 20–30.
18. Пестрякова Е.А., Курбацкий Е.Н., Нгуен Ч.Т. Спектры максимальных реакций экипажей поездов на землетрясения // Транспортные сооружения. 2019. Т. 6, № 2. С. 13.
19. Пупатенко В.В., Стоянович Г.М., Пупатенко К.В. Результаты измерения трех компонент колебаний грунтов железнодорожного земляного полотна при воздействии тяжеловесных поездов // Проектирование развития транспортной сети Дальнего Востока. 2022. № 10. С. 85–95. EDN: RMURTH.

REFERENCES

1. Instruksiya po diagnostike i monitoringu zemlyanogo polotna ОАО «RZhD» [Instructions for diagnostics and monitoring of the roadbed of JSC Russian Railways] : [utv. № 2078/r ot 29.08.2024 g.].
2. Stoyanovich G.M. Naturnoe izuchenie velichiny vibrodinamicheskogo vozdeystviya podvizhnoj nagruzki na grunty [Natural study of the values of the vibrodynamic effect of a mobile load on soils] : monografiya. Khabarovsk : Izd-vo DVGUPS, 2005. 147 s. EDN: QNSRMD.

SEASONAL VARIATIONS IN THE IMPACT OF TRAINS ON THE EARTHBED SOILS ON THE DVDI SECTION

3. Petryaev A.V. Mekhanicheskaya stabilizatsiya gruntov podshpal'ogo osnovaniya geosinteticheskimi materialami [Mechanical soil stabilization of the under-sleeper base with geosynthetic materials] : dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk. 2023. 284 s. EDN: ZBVWQX.
4. Danilyants E.S. Prognoz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zheleznodorozhnogo zemlyanogo polotna s uchetoм vibrodinamicheskogo vozdeystviya poezdov [Forecast of the stress-strain state of the railway groundbed, taking into account the vibrodynamic effect of trains] : spetsial'nost' 05.22.06 «Zheleznodorozhny put', izyskanie i proektirovanie zheleznykh dorog» : dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk. Khabarovsk, 2009. 149 s. EDN: NQJCJZ.
5. Pupatenko V.V. Prochnost' zemlyanogo polotna uzkokolejnykh zheleznykh dorog pri vozdeystvii obshchesetevogo podvizhnogo sostava (v usloviyakh Sakhalinskoj zheleznoj dorogi) [The strength of the earthwork of narrow-gauge railways under the influence of general network rolling stock (in the conditions of the Sakhalin Railway)] : spetsial'nost' 05.22.06 «Zheleznodorozhny put', izyskanie i proektirovanie zheleznykh dorog» : avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk. Sankt-Peterburg, 1993. 24 s. EDN: ZJOETN.
6. Antonovskaya G.N., Orlova I.P., Kapustian N.K. Ultralow-frequency seismic sounding of railway subgrade state by passing trains // Canadian Geotechnical Journal. 2022. Vol. 59, № 12. P. 2151–2162. EDN: EJLYZD. doi:10.1139/cgj-2021-0621
7. Kapustian N.K., Antonovskaya G.N., Orlova I.P. Soil State Testing Using Heavy Vehicle Vibrations // Energies. 2022. Vol. 15, № 3. EDN: FAYNMG. doi:10.3390/en15030830
8. Opyt registratsii i obrabotki rezul'tatov izmereniya trekh komponent kolebanij gruntov zheleznodorozhnogo zemlyanogo polotna [Experience of registration and processing of measurement results of three components of soil vibrations of a railway bed] / V.V. Pupatenko, K.V. Pupatenko, G.P. Sokolov, V.A. Shabalin // Proektirovanie razvitiya transportnoj seti Dal'nego Vostoka. 2022. № 10. Pp. 5–13. EDN: JGWOVC.
9. Danilyants E.S., Pupatenko V.V. Sezonnoe izmenenie ustojchivosti otkosov nasypej [Seasonal change in the stability of embankment slopes] // Put' i putevoe khozyajstvo. 2007. № 10. S. 17–19. EDN: IBOGQT.
10. Stoyanovich G.M., Pupatenko V.V. Rasprostranenie kolebanij v zheleznodorozhnom zemlyanom polotne pri ottaivanii sezonnno-merzlykh gruntov v usloviyakh glubokogo promerzaniya [Propagation of vibrations in the railroad bed during thawing of seasonally frozen soils in conditions of deep freezing] // Vtoroj Mezhdunarodny simpozium zemlyanogo polotna v kholodnykh regionakh : materialy simpoziuma, Novosibirsk, 24-26 sentyabrya 2015 g. / pod red. A.L. Isakova i C.K. Liu. Novosibirsk : Sibirskij gosudarstvenny universitet putej soobshcheniya. 2015. S. 71–78. EDN: VJJBAT.
11. Pupatenko V.V., Pazhentsev Ya.V. Paspredelenie plotnosti v ob'emnoj modeli zheleznodorozhnogo zemlyanogo polotna [Density distribution in a volumetric model of a railway bed]. // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2011. № 1(41). S. 153–159. EDN: NUCJBJ.
12. Antonovskaya G.N., Kapustyan N.K. Rasshirenie vozmozhnostej metoda vibrodiagnostiki dlya monitoringa zemlyanogo polotna [Expanding the possibilities of the vibration diagnostics method for monitoring the roadbed] // Put' i putevoe khozyajstvo. 2024. № 12. S. 13–16. EDN: FRBYUC.
13. Dobrovolsky I.P. Metodika opredeleniya modulya sdviga materiala zheleznodorozhnoj nasypi [Methodology for determining the shear modulus of a railway embankment material] // Voprosy inzhenernoj sejsmologii. 2023. T. 50, № 1. S. 84–88. EDN: LFGPMX. doi:10.21455/VIS2023.1-6
14. Sistema Noise-kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya zheleznodorozhnykh mostov i tunnej v sejsmoaktivnykh regionakh [The system of Noise control of the technical condition of railway bridges and tunnels in seismically active regions] / T.A. Aliyev, T.A. Babaev, T.A. Alizade [et al.] // Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. 2021. T. 22, № 5. S. 237–245. EDN: HGAXMO. doi:10.17587/mau.22.237-245
15. Pupatenko V.V., Pupatenko K.V., Sokolov G.P. Formirovanie modeli nasypi na osnove rezul'tatov obsledovaniya geofizicheskimi i traditsionnymi metodami [Formation of an embankment model based on the results of a survey using geophysical and traditional methods] // Proektirovanie razvitiya regional'noj seti zheleznykh dorog. 2021. № 9. S. 90–98. EDN: AALHEV.
16. Petriaev A. Vibration impact of trains on thawed soil subgrade // Journal of Chang'an University. 2017. Vol. 37, № 4. Pp. 18–24. EDN: XOJMRE.
17. Kurbatsky E.N., Pestryakova E.A., Kharitonov S.S. Sootnosheniya mezhdru amplitudnymi spektrami Fur'ye i spektrami maksimal'nykh reaksij (spektrami otvetov) na zemletryaseniya [The relationship between the amplitude Fourier spectra and the spectra of maximum reactions (response spectra) to earthquakes] // Striotel'stvo i rekonstruktsiya. 2020. № 1(87). S. 20–30.
18. Pestryakova E.A., Kurbatsky E.N., Nguyen C.T. Spektry maksimal'nykh reaksij ekipazhej poezdov na zemletryaseniya [Spectra of maximum reactions of train crews to earthquakes] // Transportnye sooruzheniya. 2019. T. 6, № 2. S. 13.
19. Pupatenko V.V., Stoyanovich G.M., Pupatenko K.V. Rezul'taty izmereniya trekh komponent kolebanij gruntov zheleznodorozhnogo zemlyanogo polotna pri vozdeystvii tyazhelovesnykh poezdov [Results of measurement of three components of vibrations of soils of a railroad bed under the influence of heavy trains] // Proektirovanie razvitiya transportnoj seti Dal'nego Vostoka. 2022. № 10. S. 85–95. EDN: RMURTH.

Информация об авторах

Е.С. Данильянц – кандидат технических наук, доцент кафедры «Железнодорожный путь»;
В.В. Пупатенко – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Железнодорожный путь».

Information about the authors

E.S. Danilyants – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Railway Track;
V.V. Pupatenko – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Railway Track.

Статья поступила в редакцию 24.10.2025; одобрена после рецензирования 14.11.2025; принята к публикации 14.11.2025.
The article was submitted: 24.10.2025; approved after reviewing: 14.11.2025; accepted for publication: 14.11.2025.

Научная статья
УДК 624.131.431.3
doi:10.31079/2415-8658-2025-4-41-46

СПРЯМЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ ПУТИ НА ГОРНО-ПЕРЕВАЛЬНОМ УЧАСТКЕ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Жигальцова Анна Сергеевна¹, Кудрявцев Сергей Анатольевич², Эсаулов Вячеслав Александрович³

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

¹ zhigaltsova.anna@bk.ru

² kudr@festu.khv.ru

³ esaulov-87@mail.ru

Аннотация. Представлен анализ поездной работы участка Дальневосточной железной дороги (ДВОСТЖД) в направлении портов Находкинского транспортного узла. Описана технология организации движения тяжеловесных поездов после окончания реконструкции и введения в эксплуатацию двух тоннелей на участке Шкотово–Смоляниново. Проведена оценка резерва провозной способности на направлении узла Находка, предложены технические мероприятия по увеличению степени использования провозной способности железнодорожного коридора посредством спрямления профиля пути.

Ключевые слова: лимитирующий участок, пропускная способность, провозная способность, подталкивающий локомотив, тяжеловесное движение, эстакадные конструкции

Original article

STRAIGHTENING THE TRACK PROFILE ON THE MOUNTAIN PASS SECTION OF THE FAR EASTERN RAILWAY

Zhigaltsova Anna S.¹, Kudryavtsev Sergey A.², Esaulov Vyacheslav A.³

^{1, 2, 3} Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia

¹ zhigaltsova.anna@bk.ru

² kudr@festu.khv.ru

³ esaulov-87@mail.ru

Abstract. This article presents an analysis of train operations on the Far Eastern Railway section heading toward the ports of the Nakhodka transport hub. It describes the technology for organizing heavy-haul trains traffic after the completion of reconstruction and the commissioning of two tunnels on the Shkotovo-Smolyaninovo section. The article includes calculations to estimate the carrying capacity reserve in the direction of Nakhodka junction and proposes technical measures to enhance the extent of using the carrying capacity of the railway corridor by means of straightening the track profile.

Keywords: limiting section, throughput capacity, carrying capacity, pushing locomotive, heavy-haul traffic, overpass structures

Введение

Развитие и эффективное функционирование железнодорожного транспорта создает условия для стабильного роста национальной экономики. В связи со сложившейся политической ситуацией ввиду снижения товарооборота со странами Европейского Союза, США и их союзниками, Россия стремительно развивает экономическое сотрудничество со странами Азиатско-Тихоокеанского региона. Рациональная реализация транспортного потенциала, влияющая на процессы глобализации и формирование новых зон влияния, установление долгосрочных экономических связей с зарубежными партнерами на границе Восточного полигона страны, позволит получить положительный эффект от участия в международных перевозках и создаст новые инструменты влияния России на мировые экономические процессы.

Реализация проекта развития Восточного полигона, в рамках которого проводится комплексная модернизация Байкало-Амурской и Транссибирской магистралей с устранением барьерных ограничений в пределах Забайкальской и Дальневосточной железных дорог, приведет к увеличению пропускной способности сети до 280 млн т в год к 2035 г. [1]. Правительством Российской Федерации поставлена стратегическая цель – проведение системной работы по выстраиванию транспортных коридоров и формированию оптимальных логистических цепочек для снижения себестоимости перевозок и, как следствие, повышение конкурентоспособности продукции отечественного производства на мировых рынках. Модернизация железнодорожной инфраструктуры и портовых мощностей является одним из важнейших элементов по стратегии развития транспорта [2, 3] (рис. 1).

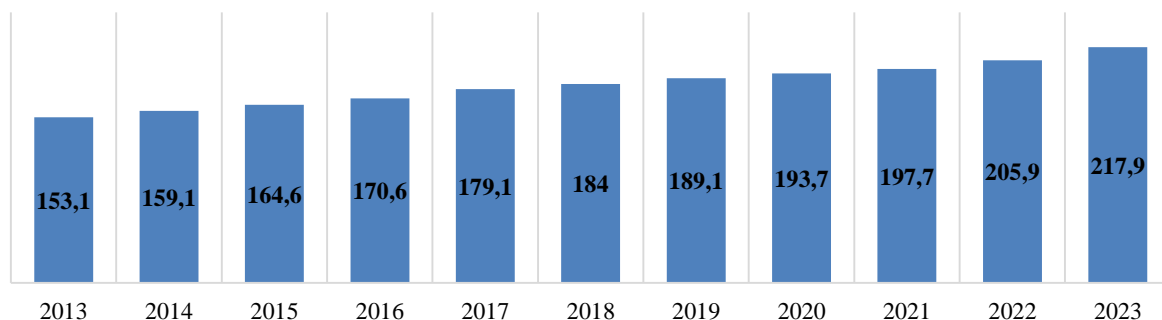


Рис. 1. Объем перевозок грузов в прямом и местном сообщении, млн т

Анализ степени использования пропускной способности и проблематика участка в направлении транспортного узла Находка

Согласно статистическим данным за последние 10 лет на ДВОСТЖД достигнут рост перевозок грузов в транзитном (следующем с других дорог) и местном (внутридорожном) сообщениях на 64,8 млн т (+42 %).

Проблема, которую необходимо решить для дальнейшей интенсификации роста перевозок, является устранение барьерного ограничения на подходе к припортовым зонам транспортного узла Находка Дальневосточной железной дороги.

Дальнейший рост грузопотока к транспортному узлу Находка осложнен наличием горно-перевального участка. Рельеф по маршруту следования от станции Смоляниново до станции Красноармейский осложнен наличием переломов продольного профиля, затяжными подъемами и спусками, в сочетании с кривыми малого радиуса. В данных условиях для организации движения поездов необходимо применение дополнительной меры – использования второго локомотива подталкивания, размещаемого в хвосте состава для всех поездов, масса которых превышает 3400 т [4]. Схема направления представлена на рис. 2.

В рамках реализации инвестиционного проекта «Модернизация железнодорожной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорож-

ных магистралей с развитием пропускных и провозных способностей» в конце 2024 г. завершился этап строительства двухпутного обхода от станции Смоляниново до станции Шкотово, целью которого являлось исключение кривых малого радиуса (от 195 м) и спрямление продольных уклонов с 25,0 до 9,0 ‰.

В настоящее время движение поездов организовано с использованием подталкивающего локомотива от станции Новонежино до станции Красноармейский (протяженность участка подталкивания 49 км с 64КМ ПК1 по 113 км ПК5, начало затяжного подъема с 68КМ ПК0). Горно-перевальный профиль пути пилообразный, пиковые значения уклонов достигают 26,8 ‰. Локальные переломы профиля пути составляют 50 ‰. Схематичное изображение профиля пути на участке подталкивания изображено на рис. 3.

В ходе анализа эксплуатационной работы за период с января по апрель 2025 г., после ввода в эксплуатацию тоннелей на перегоне Шкотово–Смоляниново, определен резерв провозной способности: фактический среднесуточный пропуск поездов через железнодорожную станцию Смоляниново в направлении узла Находка составляет 42 поезда. Детализация среднесуточного поездопотока по станциям назначения в направлении узла Находка представлена в табл. 1.

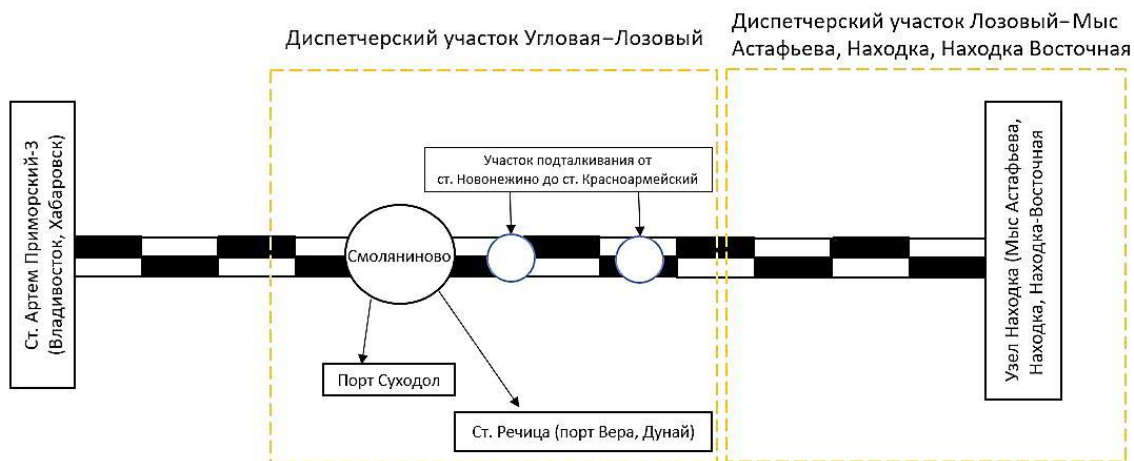


Рис. 2. Схема железнодорожных линий на участке следования к припортовым станциям Находкинского узла

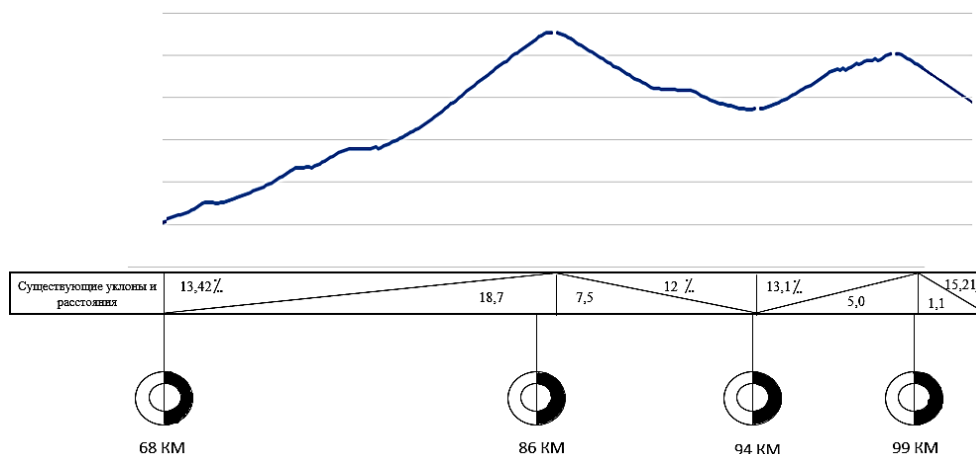


Рис. 3. Схема профиля пути на участке подталкивания Новонежино–Красноармейский

Таблица 1

Детализация поездопотока, следующего в направлении станций узла Находка

Наименование станции	Количество пропускаемых поездов в сутки
1. Находка-Восточная	27
2. Находка	5
3. Мыс Астафьева	6
4. Крабовая	3
5. Рыбники	1
Итого	42

Среднее количество вагонов в поездах (составность), следующих в направлении транспортного узла Находка, насчитывает 59,4 вагона, средняя масса поезда – 5900 т. Исходя из этого, среднесуточный пропуск составляет $59,4 \cdot 42 = 2494$ вагона; суммарная перерабатывающая способность припортовых станций – 4415 вагонов в сутки. Детализация перерабатывающих способностей станций узла Находка приведена в табл. 2.

Таблица 2

Детализация перерабатывающих способностей станций узла Находка

Станция	Перерабатывающая способность, ваг./сут
1. Находка-Восточная	2549
2. Находка	680
3. Мыс Астафьева	679
4. Крабовая	342
5. Рыбники	165
Итого	4415

Перерабатывающая способность терминалов припортовых станций превышает фактическое количество доставляемых перевозчиком вагонов на 1921 вагон в сутки ($4415 - 2494$), средняя загрузка перерабатывающих способностей припортовых станций составляет 56,5 % ($2494 / 4415 \cdot 100$ %).

Резерв провозной способности можно определить по формуле

$$Q_{\text{деф}} = \frac{365 N_{\text{деф}} Q_{\text{сост}}}{m_{\text{сост}} \cdot 10^6}, \quad (1)$$

где $N_{\text{деф}}$ – среднесуточный резерв пропускной способности (рассчитан выше, составляет 1921 вагон); $m_{\text{сост}}$ – средний состав поезда (59,4 вагона); 365 – количество дней в году, $Q_{\text{сост}}$ – средний вес поезда (5900 т); 10^6 – коэффициент для перевода тонн в млн т

$$Q_{\text{деф}} = \frac{365 \cdot 1921 \cdot 5900}{59,4 \cdot 10^6} = 69,64 \text{ млн т/год.}$$

Таким образом, резерв провозной способности на направлении составляет 69,64 млн т/год.

Способ повышения степени использования провозной способности за счет снятия барьерных ограничений

С целью обеспечения роста грузовых перевозок в направлении узла Находка предлагается спрямление профиля пути для обеспечения возможности движения тяжеловесных поездов без использования подталкивающих локомотивов за счет строительства эстакадных сооружений.

Спрямление профиля пути за счет устройства традиционных насыпей и выемок в местных условиях не представляется возможным из-за колоссального объема земляных работ, а также необходимости применения дорогостоящих инженерных решений по водоотведению. Земляное полотно в границах Приморского края подвержено систематическим осадкам грунтов, вызванным высокими межсезонными и суточными колебаниями температур, обильными осадками и наводнениями.

В данных геологических условиях можно рассматривать два варианта для спрямления профиля: устройство подземных тоннелей или наземных эстакадных конструкций (рис. 4).

Преимущества применения эстакадных конструкций над тоннелями

Простота изысканий и проектирования	Устройство существующих коммуникаций под эстакадой
Меньший бюджет на строительство	Отсутствие проблем с размывом и смерзанием грунта
Простота обслуживания и производства ремонтных работ	Длительный безремонтный период эксплуатации

Рис. 4. Преимущества применения эстакадных конструкций перед тоннелями

В сравнении со строительством тоннелей, эстакадные конструкции отличаются простотой инженерных изысканий и проектирования, являются более бюджетными в исполнении. Принимая во внимание опыт и технологии строительства, отработанные в Китайской Народной Республике, можно утверждать, что эстакадные конструкции выдерживают длительные безремонтные периоды эксплуатации и предполагают более легкий способ ремонта в сравнении с производством данных работ в тоннелях. В Китае 85 % путей проложены на виадуках, что позволяет значительно уменьшить затраты на ландшафтные работы, не требует отвода дополнительных земельных участков для строительства, а также устройства вентиляции и проведения мероприятий по защите грунта от размыва, как при подземном строительстве. Эстакады позволяют осуществлять прокладку коммуникаций открытым способом без проведения земляных работ [5, 6].

Дополнительным фактором в пользу строительства эстакад является возможность использования природных материалов, добываемых на территории Дальнего Востока. В настоящее время в Хабаровском крае исследуется высокопрочный легкий бетон, где в качестве заполнителя применяется туф Святогорского месторождения. Совместно со специалистами из Российской академии архитектуры и строительных наук выполняется сопоставление свойств высокопрочных лёгких бетонов классов В55-В70 с разными заполнителями. Значения модуля упругости легкого бетона на святогорском туфе находятся на уровне 28–30 ГПа, в зависимости от состава бетонной смеси. Туф, будучи строительным материалом, обладает рядом полезных свойств, таких как прочность, устойчивость к перепадам температур и хорошая тепло- и звукоизоляция, легкость в обработке, что позволяет придавать ему различные формы [7].

Расчет проектного уклона

В рамках исследования приведен расчёт величины проектного уклона и его протяженность до первой пиковой точки на вершине существующего подъема. В имеющихся условиях целесообразно сохранить существующую путевую инфраструктуру железнодорожной станции Смоляниново ввиду больших финансовых затрат на реконструкцию.

Таким образом, расчетная точка начала устройства эстакадной конструкции – 50 КМ ПК0 (граница станции Смоляниново). Существующее расстояние от границы станции до пиковой точки на вершине подъема составляет 36 км 600 м.

При данном расстоянии можно вычислить проектную величину уклона по формуле:

$$i_{\text{проект}} = \frac{\sum i_{\text{сущ}} S_{\text{сущ}}}{S_{\text{общ}}}, \quad (2)$$

где $i_{\text{сущ}}$ – уклон существующего пути, ‰; $S_{\text{сущ}}$ – протяженность существующего уклона, м; $S_{\text{общ}}$ – общая протяженность элемента пути, м,

$$i_{\text{проект}} = \frac{5,61 \cdot 17,9 + 13,42 \cdot 18,7}{36,6} = 9,6 \text{ ‰}.$$

При данных параметрах протяженность эстакадной конструкции на подъеме к вершине составит 36,6 км с руководящим уклоном 9,6 ‰. Для снижения капитальных затрат целесообразно принять руководящий уклон, при котором максимально допустимая масса поезда с локомотивом серии 4ЭС5К без использования подталкивающего локомотива равна 8250 т, составляющий 10,7 ‰ [2].

Протяженность эстакадной конструкции при таком руководящем уклоне рассчитываем по формуле

$$L_{\text{эст}} = \frac{h}{i_{\text{проект}}} 1000, \quad (3)$$

где h – разность отметок высот, при руководящем уклоне 10,7 ‰, составляет 333,1 м; $i_{\text{проект}}$ – проектный уклон, ‰,

$$L_{\text{эст}} = \frac{333,1}{10,7} 1000 = 31,13 \text{ км}.$$

Таким образом, протяженность эстакады на подъеме к вершине при руководящем уклоне 10,7 ‰ уменьшится на 5,47 км.

Схема существующего уклона и расстояния на подъеме к первой пиковой точке и проектные траектории эстакад при двух разных величинах уклонов представлены на рис. 5.

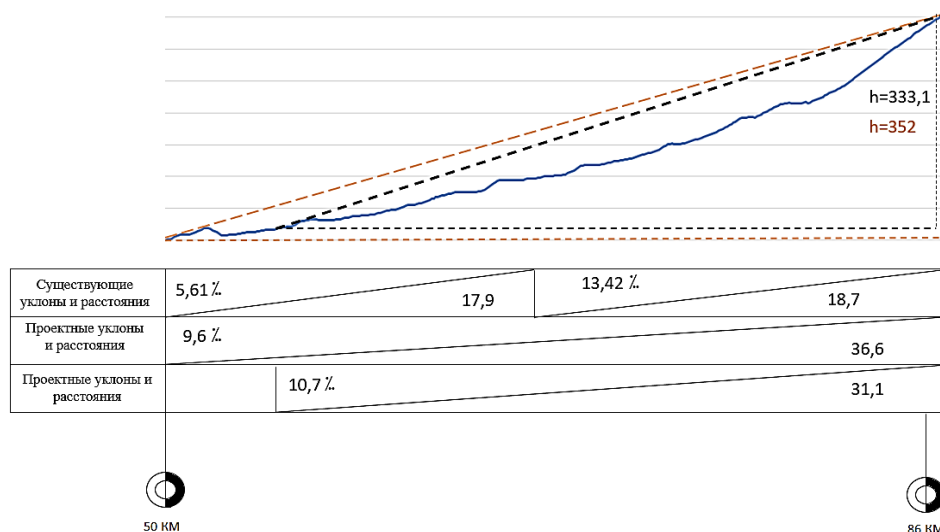


Рис. 5. Схема существующего уклона и расстояния на подъеме к первой пиковой точке и проектные траектории эстакад при двух разных величинах уклонов

Вывод

Согласно проведенным расчетам перерабатывающая способность станций транспортного узла города Находка превышает возможности инфраструктуры по пропуску поездов. Резерв провозной способности на направлении составляет 69,64 млн т в год. Для повышения степени использования провозной способности предложен метод возведения эстакадных конструкций, позволяющий упразднить использование подталкивающих локомотивов.

Дальнейшая интенсификация роста перевозок приведет к технологической перегрузке и росту дефицита пропускной способности имеющейся инфраструктуры ОАО «РЖД», что повлечет за собой

снижение надежности доставки груза в адрес грузополучателей за счет применения регулировочных мер по подводу поездов к станциям выгрузки.

Увеличения пропускной способности благодаря введению в эксплуатацию тоннелей на перегоне Шкотово–Смоляниново недостаточно для выполнения потребностей пользователей железнодорожного транспорта в перевозке грузов на участке подвода к припортовым станциям транспортного узла Находка. Для дальнейшего увеличения пропускной способности линии необходима разработка технических решений по полному отказу от применения подталкивающих локомотивов на участке Угловая–Лозовый.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877р.
2. Васянин А.К., Дружинина М.Г. Перспективные направления развития железнодорожных перевозок на Дальнем Востоке // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения : труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Новокузнецк, 14–16 мая 2019 г. ; под общ. ред. М.В. Темлянцева. Вып. 23. Ч. VII. Новокузнецк : Сибирский государственный индустриальный университет, 2019. С. 221–224.
3. Болотин К.А. Развитие железнодорожной логистики на Дальнем Востоке России: вызовы и возможности в эпоху политики разворота на Восток // Цифровые технологии в финансовой сфере : сборник материалов Международной студенческой конференции, Москва, 27 ноября 2023 г. Москва : КноРус, 2023. С. 33–36.
4. Об установлении норм массы и длины пассажирских и грузовых поездов на участках, обслуживаемых структурными подразделениями дирекции тяги : распоряжение ОАО «РЖД» от 10 апреля 2024 г. № ЦТ-51.
5. Особенности проектирования трассы железной дороги в условиях вечной мерзлоты / Н.С. Бушуев, С.В. Шкурников, В.А. Герасимов [и др.]. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019. Т. 63, № 3. С. 135–142. doi:https://doi.org/10.26731/1813-9108.2019.3(63).135–142
6. Кудрявцев С.А., Сахаров И.И., Парамонов В.Н. Создание условий нормативного состояния деградирующих многолетнемерзлых оснований зданий и сооружений Дальневосточного федерального округа и Арктики // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2021 г. : сборник научных трудов РААСН. Т. 2. Москва : АСВ, 2022. С. 157–164
7. Новые подходы к проектированию и строительству железных и автомобильных дорог в криолитозоне / И.И. Сахаров, С.А. Кудрявцев, В.Н. Парамонов, Т.Ю. Вальцева // Транспортные сооружения. 2024. Т. 11, № 2.
8. Embankment on permafrost Eastern Polygon of Baikal-Amur Mainline / S.A. Kudryavtsev, E.D. Goncharova, Z.I. Kotenko, D.O. Grigoriev // Proceedings of the International Scientific Conference Transportation Geotechnics and Geoecology (TGG-2017). 2017. С. 774–782. (Procedia Engineering).

STRAIGHTENING THE TRACK PROFILE ON THE MOUNTAIN PASS SECTION OF THE FAR EASTERN RAILWAY

9. Borisova A., Kudryavtsev S, The research of the freezing and thawing process of the foundations with the use of season and cold-producing devices // MATEC Web of Conferences. 2018. P. 03040.
10. Использование метода конечных элементов в решении задач геотехники / А.Г. Шашкин, С.А. Кудрявцев, В.Н. Парамонов, И.И. Сахаров. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2014. 162 с.
11. Sakharov I.I., Paramonov V.N., Kudryavtsev S.A. The account of frost heave and thawing processes when designing road embankments in cold regions // Transportation Soil Engineering in Cold Regions : Proceedings of TRANSOILCOLD 2019. Vol. 49. Singapore, 2020. P. 19–24. (Lecture Notes in Civil Engineering).

REFERENCES

1. Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossijskoj Federatsii do 2030 goda: rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federatsii ot 17 iyunya 2008 g. № 877r. [Strategy for the Development of Railway Transport in the Russian Federation until 2030 : Order of the Government of the Russian Federation of June 17. 2008. № 877r.]
2. Vasyanin A.K., Druzhinina M.G. Perspektivnye napravleniya razvitiya zheleznodorozhnykh perevozok na Dal'nem Vostoke [Promising directions for the development of rail transportation in the Far East] // Nauka i molodezh': problemy, poiski, resheniya Trudy Vserossijskoj nauchnoj konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, Novokuznetsk, 14–16 maya 2019 g.; pod obshch. red. M.V. Temlyantseva. Vyp. 23. Ch.VII. Novokuznetsk : Sibirskij gosudarstvennyy industrial'nyy universitet, 2019. S. 221–224.
3. Bolotin K.A. Razvitie zheleznodorozhnoj logistiki na Dal'nem Vostoke Rossii: vyzovy i vozmozhnosti v epokhu politiki razvorota na Vostok [Development of railway logistics in the Russian Far East: challenges and opportunities in the epoch of a turn to the East policy] // Tsifrovye tekhnologii v finansovoy sfere: Sbornik materialov Mezhdunarodnoj studencheskoj konferentsii, Moskva, 27 noyabrya 2023 g. Moskva : KnoRus, 2023. Pp. 33–36.
4. Ob ustanovlenii norm massy i dliny passazhirskikh i gruzovykh poezdov na uchastkakh, obsluzhivaemykh strukturnymi podrazdeleniyami direktcii tyagi [On Establishing Standards for the Weight and Length of Passenger and Freight Trains on Sections Served by Structural Divisions of the Traction Directorate] : rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 10 aprelya 2024 g. № TsT-51.
5. Osobennosti proektirovaniya trassy zheleznoj dorogi v usloviyakh vечноj merzloty [Features of railway route design in permafrost conditions] / N.S. Bushuev, S.V. Shkurnikov, V.A. Gerasimov [et al.] // Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie. 2019. T. 63. № 3. S. 135–142. doi:[https://doi.org/10.26731/1813-9108.2019.3\(63\).135-142](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2019.3(63).135-142)
6. Kudryavtsev S.A., Sakharov I.I., Paramonov V.N. Sozdanie uslovij normativnogo sostoyaniya degradiruyushchikh mnogolennemzlykh osnovanij zdaniy i sooruzhenij Dal'nevostochnogo federal'nogo okruga i Arktiki [Creating conditions for the normative state of degrading permafrost foundations of buildings and structures of the Far Eastern Federal District and the Arctic] // Fundamental'nye, poiskovyie i prikladnyie issledovaniya RAASN po nauchnomu obespecheniyu razvitiya arkhitektury, gradostroitel'stva i stroitel'noj otrasli Rossijskoj Federatsii v 2021 g.: Sbornik nauchnykh trudov RASSN. T.2. Moskva : ASV, 2022. S. 157–164.
7. Novye podkhody k proektirovaniyu i stroitel'stvu zheleznykh i avtomobil'nykh dorog v kriolitozone [New approaches to the design and construction of railways and highways in the cryolite zone] / I.I. Sakharov, S.A. Kudryavtsev, V.N. Paramonov, T.Yu. Valtseva // Transportnye sooruzheniya. 2024. T. 11, № 2.
8. Embankment on permafrost Eastern Polygon of Baikal-Amur Mainline / S.A. Kudryavtsev, E.D. Goncharova, Z.I. Kotenko, D.O. Grigoriev // Proceedings of the International Scientific Conference Transportation Geotechnics and Geocology (TGG-2017). 2017. Pp. 774–782. (Procedia Engineering).
9. Borisova A., Kudryavtsev S, The research of the freezing and thawing process of the foundations with the use of season and cold-producing devices // MATEC Web of Conferences. 2018. P. 03040.
10. Ispol'zovanie metoda konechnykh elementov v reshenii zadach geotekhniki [Use of finite element method in solving tasks of geotechnics] / A.G. Shashkin, S.A. Kudryavtsev, V.N. Paramonov, I.I. Sakharov. Khabarovsk : Izd-vo DVGUPS, 2014. 162 s.
11. Sakharov I.I., Paramonov V.N., Kudryavtsev S.A. The account of frost heave and thawing processes when designing road embankments in cold regions // Transportation Soil Engineering in Cold Regions : Proceedings of TRANSOILCOLD 2019. Vol. 49. Singapore, 2020. Pp. 19–24. (Lecture Notes in Civil Engineering).

Информация об авторах

- А.С. Жигальцова – аспирант кафедры «Мосты, тоннели и подземные сооружения»
- С.А. Кудрявцев – член-корреспондент Российской академии архитектуры и строительных наук, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Мосты, тоннели и подземные сооружения»;
- В.А. Эсаулов – кандидат технических наук, заместитель начальника Дальневосточного отдела логистики перевозок и информационного анализа Центра управления перевозками на Восточном полигоне – структурного подразделения Центральной дирекции управления движением – филиала ОАО «РЖД», доцент кафедры «Управление процессами перевозок».

Information about the authors

- A.S. Zhigaltsova – Post-graduate Student, Department of Bridges, Tunnels and Underground Structures;
- S.A. Kudryavtsev – Corresponding Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of the Department of Bridges, Tunnels and Underground Structures;
- V.A. Esaulov – Candidate of Science (Engineering), Deputy Chief of the Far Eastern Office of Transportation Logistics and Information Analysis of the Transportation Control Center at the Eastern Polygon – a structural division of the Central Directorate of Traffic Control – a branch of JSC «RZhD», Associate Professor, Department of Transportation Processes Management;

Статья поступила в редакцию 15.10.2025; одобрена после рецензирования 08.11.2025; принята к публикации 08.11.2025.
The article was submitted: 13.05.2025; approved after reviewing: 08.11.2025; accepted for publication: 08.11.2025.

Научная статья
УДК 629.12: 62-622
doi:10.31079/2415-8658-2025-4-47-53

БЕСПИЛОТНАЯ РОБОТИЗИРОВАННАЯ МОРСКАЯ ПЛАТФОРМА С ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ НА ВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Жильцов Андрей Сергеевич¹, Муровский Сергей Петрович², Кувшинов Владимир Владиславович³,
Цалоев Владимир Муратович⁴, Артёменко Игорь Дмитриевич⁵

^{1, 3, 4, 5} Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

² Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия, murovski@inbox.ru

¹ 29novel@gmail.com

³ kuvshinov.vladimir@gmail.com

⁴ 1._@mail.ru

⁵ leftysingle@gmail.com

Аннотация. Судовые энергетические установки на основе альтернативных источников энергии в настоящее время представляют значительный интерес для разработчиков и исследователей в областях морского транспорта и энергетики. В представленной работе была разработана автономная беспилотная роботизированная морская платформа, способная значительное время функционировать автономно, сокращающая потребление экологически вредного органического топлива и использующая для питания двигателей электрическую энергию, вырабатываемую топливными элементами. Данная система автономного управления морским судном позволяет увеличить эффективность использования энергии и повысить собственную экономическую составляющую.

Ключевые слова: беспилотная роботизированная морская платформа, водородный топливный элемент, реактор-дегидратор, система автоматического управления

Original article

UNMANNED ROBOTIC OFFSHORE PLATFORM WITH HYDROGEN FUEL CELL POWER PLANT

Zhiltsov Andrey S.¹, Murovsky Sergey P.², Kuvshinov Vladimir V.³,
Tsaloev Vladimir M.⁴, Artemenko Igor D.⁵

^{1, 3, 4, 5} Institute of Nuclear Energy and Industry of Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

² Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia, murovski@inbox.ru

¹ 29novel@gmail.com

³ kuvshinov.vladimir@gmail.com

⁴ 1._@mail.ru

⁵ leftysingle@gmail.com

Abstract. Marine power plants based on alternative energy sources are currently of considerable interest to developers and researchers in the fields of marine transport and energy. In the presented work, an autonomous unmanned robotic marine platform was developed, which uses a hydrogen-fueled power plant to power engines. The presented unmanned robotic marine platform is capable to work autonomously for a significant time, reduces the use of environmentally harmful organic fuel and uses the electric energy generated by fuel cells as power source. Developed system of autonomous control of sea vessel makes it possible to increase efficiency of energy use and to increase economic component of presented system.

Keywords: unmanned robotic offshore platform, hydrogen fuel cell, dehydrator reactor, automatic control system

Введение

Энергия имеет решающее значение для развития техники и технологий в современном мире. Большинство энергетических потребностей удовлетворяется за счет ископаемого топлива. Быстрая индустриализация и передовые технологии оказывают влияние на экономию топлива, но растущее потребление вызывает антропогенное воздействие, негативно влияющее на окружающую среду и здоровье человека. Увеличивающиеся потребности в электроэнергии

приводят к истощению ископаемых ресурсов, и в ближайшем будущем человечество столкнется с их острой нехваткой. Кроме того, необходимо учитывать неравномерное географическое распределение ископаемых видов топлива и последствия его использования для климата нашей планеты.

На сегодня одной из немногих экологически безопасных технологий, способных составить альтернативу загрязняющему атмосферу органическому топливу, является водородная энергетика. В этом

контексте водород является чистым и эффективным энергоносителем и может использоваться в качестве топлива без выбросов оксидов углерода [1].

Водородная энергетика подразумевает решение двух проблем. Первая – получение водорода, вторая – его энергетическое использование. Единственной технологией, оправдывающей переход на водород с энергетической и экономической точек зрения, являются топливные элементы (ТЭ), или электрохимические генераторы, использующие технологию прямого преобразования химической энергии водородного топлива в электрическую энергию, т.е. процесс, проходящий в одну стадию. Главными конкурентными преимуществами энергетических установок с ТЭ являются их высокая энергетическая эффективность, надежность, почти полное отсутствие вредных выбросов и бесшумность [2].

Номинальная единичная мощность современных энергоустановок на базе ТЭ составляет от 1 до 100 кВт. Они могут эффективно применяться на транспорте, в системах резервного электропитания, для покрытия пиковых нагрузок, поскольку имеют наиболее высокий КПД. Принципиальной отличительной особенностью создания подобных энергоустановок является их модульность, т.е. набор мощности осуществляется дополнительной установкой большого числа однотипных элементов. Применение ТЭ в сочетании с аккумуляторами (АКБ) помогает оптимизировать энергосистему, обеспечивая при этом оптимальный срок эксплуатации оборудования и повышая ее производительность. Таким образом, аккумуляторные батареи и ТЭ прекрасно дополняют друг друга при эксплуатации на различных стационарных и передвижных устройствах [3].

В данной работе для генерации электрической энергии и обеспечения мощностных характеристик судовой энергетической установки рассматривается использование экологически чистого водорода как основного элемента для работы судового оборудования беспилотной роботизированной морской платформы (РМП). Применение экологически чистой энергии для морского транспорта позволяет увеличить привлекательность таких судов и увеличивать мощностные характеристики энергосистемы без использования органических топлив, которые необходимо иметь на борту в значительных количествах.

Цель исследования: разработка беспилотной роботизированной морской платформы с энергетической установкой на водородных топливных элементах (РМП-ВЭУ) и проведение испытаний пилотного образца для повышения эффективности его энергетических характеристик и управляемости в реальных условиях.

Задачи исследования: определение энергетических характеристик оборудования универсального функционального модуля морской энергетиче-

ской установки; разработка электрических схем; определение параметров аккумуляторных батарей и накопителей энергии, влияющих на электрическую мощность установки; проверка работоспособности программного обеспечения для эффективного функционирования различных узлов и блоков системы управления установки.

Методы исследования. В ходе работы применялись аналитические и экспериментальные методы исследования на реальной модели беспилотной роботизированной морской платформы с целью подтверждения эффективности разработанных схем и управляемости в реальных условиях.

Материалы, использованные в исследовании

Беспилотная роботизированная морская платформа с энергетической установкой на водородных ТЭ является экспериментальным водным транспортным средством с экологически чистой безопасной энергетической установкой нового поколения, использующей водород в качестве топлива [4]. В отличие от других энергетических установок, работающих на водородных топливных элементах, принцип работы РМП-ВЭУ основывается на преобразовании химической энергии водорода в ТЭ, полученный в процессе дегидрирования безопасного жидкого органического носителя водорода. ВЭУ на ТЭ имеет компактную конструкцию, где отдельные компоненты эффективно объединены, в том числе реактор-дегидратор [5] для обеспечения топливом батареи водородных ТЭ, и литий-ионные аккумуляторы (рис. 1).

Для проработки выбранных решений с целью использования водорода в качестве средства для аккумуляции, транспортировки и генерации электрической энергии [6] было выбрано маломерное судно типа «Катамаран» (рис. 2) [7].

РМП-ВЭУ может использоваться для мониторинга окружающей обстановки в прибрежных зонах озер и морей, а также как рабочее транспортное средство. ВЭУ на ТЭ предназначена для обеспечения автономного электропитания всех устройств РМП (рис. 3) [4].

Электропитание оборудования осуществляется от буферной литий-ионной АКБ непосредственно или через инвертор И2; автоматическая подзарядка АКБ – через ЗУ и инвертор И1 от водородной ЭУ, состоящей из батареи ВТЭ и дегидратора (ДГ). Весь газообразный водород, который образуется в процессе дегидрирования безопасного жидкого органического носителя водорода, находящегося в хранилище (ХВ), полностью перерабатывается в водородной энергетической установке без промежуточного хранения. Внешний вид установки представлен на рис. 4, технические характеристики ВЭУ – в табл. 1.

Технические характеристики РМП-ВЭУ приведены в табл. 2.

БЕСПИЛОТНАЯ РОБОТИЗИРОВАННАЯ МОРСКАЯ ПЛАТФОРМА С ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ НА ВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

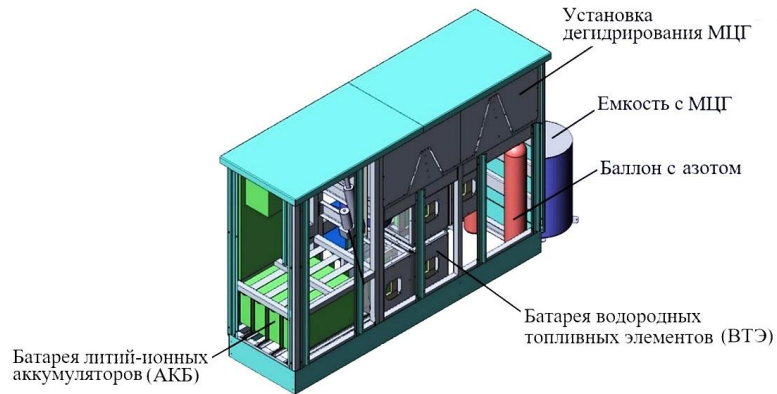


Рис. 1. Внешний вид водородной энергетической установки

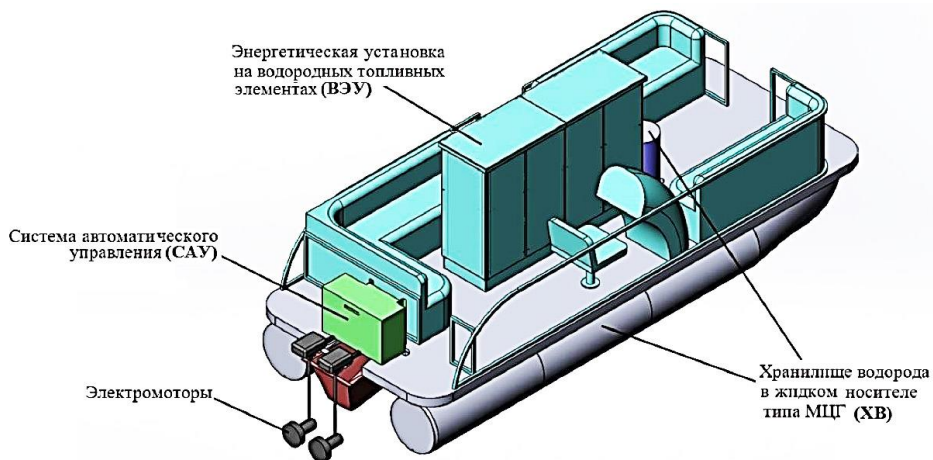


Рис. 2. Внешний вид модели беспилотной роботизированной морской платформы на водородном топливе

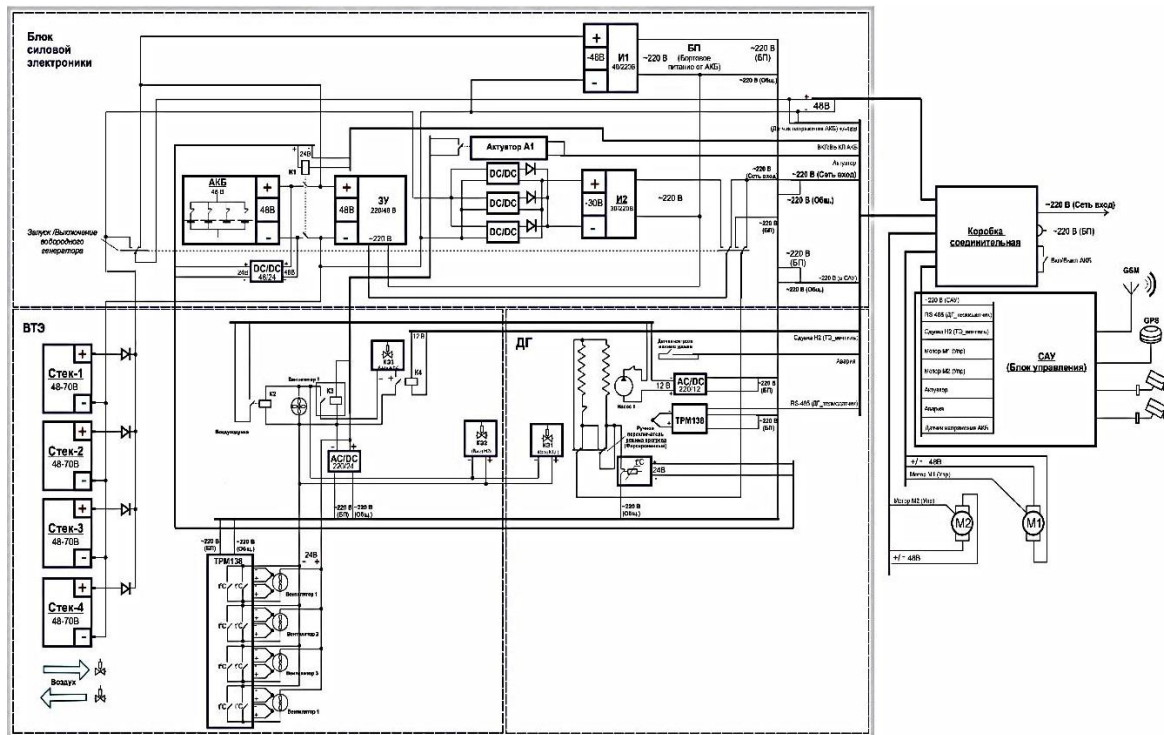


Рис. 3. Электрическая схема ВЭУ беспилотной роботизированной морской платформы

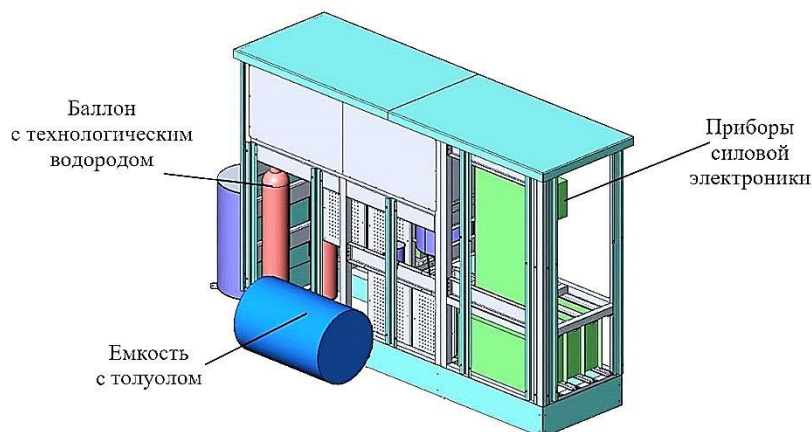


Рис. 4. Внешний вид водородной энергетической установки

Таблица 1

Характеристики водородной энергетической установки

Наименование	Значение показателя, ед. изм.
Мощность (в режиме ЗС)	50 кВт
Запасенная энергетическая ёмкость	85 кВт·ч
Мощность литий-ионной АКБ (в режиме ЗС)	50,0 кВт
Энергетическая ёмкость АКБ	15,0 кВт·ч
Установленная мощность ВТЭ	10,0 кВт
Производительность дегидрататора (по водороду)	2,0 м ³ /ч
Тип жидкого органического носителя, МЦГ	СН ₃ С ₆ Н ₁₁
Объем запасённого жидкого органического носителя	60 л
Объем емкости жидкого органического носителя	200 л
Инверторная подсистема преобразователей (И):	
И1:	
мощность	3 кВт
напряжение входное/выходное	24/220 В
И2:	
мощность	1,5 кВт
напряжение входное/выходное	15–30/220 В
габаритные размеры (корпус 1)	1502×2220×660 мм
масса, не более	700 кг

Таблица 2

Технические характеристики РМП-ВЭУ

Наименование	Значение показателя, ед. изм.
1. Судно:	
тип	Катамаран
длина наибольшая	6,4 м
ширина	2,44 м
высота борта	0,75 м
полное водоизмещение, не более	1,59 т
мореходность (волнение до 1,25 м)	0,7 баллов
2. Электромоторы с традиционными гребными винтами:	
количество	2 шт.
напряжение	48 В
мощность	2,2+2,2 кВт
3. Видеокамеры наблюдения:	
количество	2 шт.
тип	IP-камеры уличные (IPTRONIC IPT-IPL1080BM (3,6) P h.264
алгоритм сжатия	
количество кадров, кадров в секунду	25
разрешение	1280/760
4. РМП-ВЭУ:	
габаритные размеры	5980×2440×750 мм
масса, не более	2000 кг

Экспериментальные исследования

Авторами была разработана блок-схема электрических соединений РМП-ВЭУ (рис. 5).

Беспилотная роботизированная морская платформа с энергетической установкой на водородных топливных элементах (см. рис. 2) включает следующие элементы:

- энергетическую установку на водородных топливных элементах (ВТЭ);
- систему автоматического управления САУ «Буран-В»;
- блок силовой электроники;
- реактор-дегидрататор (ДГ) с хранилищем водорода в жидком носителе (МЦГ).

На РМП для обеспечения движения и маневрирования установлены электромоторы, а также видеокамеры для наблюдения за обстановкой.

Управление РМП-ВЭУ осуществляется дистанционно, по беспроводным каналам связи, при помощи выносного пульта управления (ВПУ) САУ «Буран-В», обеспечивающего видеоконтроль за движением РМП-ВЭУ и контроль за всеми основными элементами электрической силовой и водородной части РМП-ВЭУ. Блок управления САУ «Буран-В» гарантирует безопасную эксплуатацию на всех режимах, диагностику и предоставляет интерфейс пользователю [8].

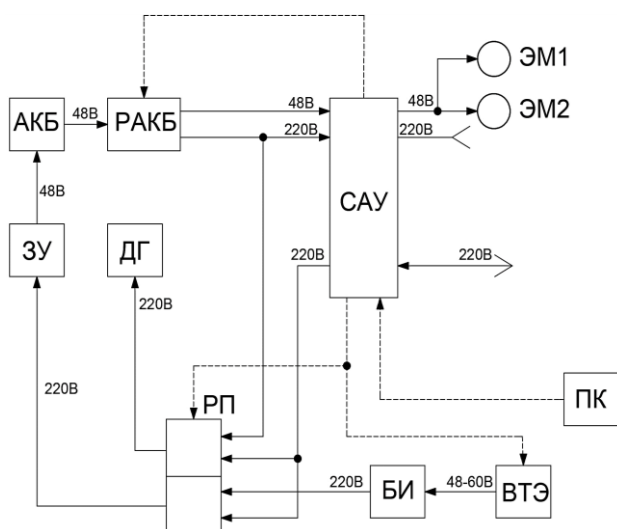


Рис. 5. Блок-схема электрических соединений РМП-ВЭУ: АКБ – литий-ионная аккумуляторная батарея; ЗУ – зарядное устройство; РАКБ – блок системы силового размыкателя АКБ; ЭМ – электромоторы; ДГ – дегидратор; РП – блок системы силового размыкателя РМП-ВЭУ, БИ – блок инверторов; ВТЭ – батарея водородных топливных элементов; ПК – мобильный ПК с выносным пультом управления САУ «Буран-В»

При проведении испытаний использование РМП-ВЭУ осуществлялось путем управления движением через виртуальные кнопки на ВПУ в беспилотном режиме. Дистанционный контроль за перемещением РМП-ВЭУ производился через камеры наблюдения и GPS-навигатор с отображением текущих координат с привязкой к карте местности [9]. На РМП-ВЭУ при проведении испытаний были реализованы два режима работы:

1) питание от внешней сети 220 В: «Подготовительный режим». В данном режиме автоматически осуществлялся предварительный разогрев дегидратора, зарядка аккумуляторных батарей, а также продувка технологических линий ВЭУ и другие регламентные работы;

2) штатный режим работы: «Бортовое питание». Электропитание РМП-ВЭУ осуществляется в автономном режиме от бортовой буферной литий-ионной АКБ с автоматической подзарядкой от бортовой ЭУ на ВТЭ.

Внешний вид, внутреннее устройство и расположение блоков САУ «Буран-В» изображено на рис. 6. Программное обеспечение, установленное на программируемые микроконтроллеры, разработано специально для САУ «Буран-В» и является proprietарным.

Основная функция САУ «Буран-В» – обеспечение беспилотного режима управления РМП-ВЭУ. Команды поступают с выносного пульта управления по каналу связи с оператором. Создание канала связи и его шифрование обеспечивается с помощью роутера. ПЛК отвечает за выполнение основ-

ных функций устройства и диагностику неполадок. Информационный обмен между роутером и ПЛК осуществляется по протоколу «Modbus». Рабочее место оператора (РМО) состоит:

- из ВПУ, реализованного на базе мобильного ПК, работающего под управлением операционной системы Windows;
- 2G/3G-роутера с блоком питания и антеннами;
- программного обеспечения (ПО).



Рис. 6. Внешний вид САУ РМП-ВЭУ с установленными гребными электродвигателями

Для передачи данных и управляющих команд используется протокол МЭК 60870-5-104.

На РМО передаются сигналы:

- о режиме работы САУ «Буран-В» (подготовительный, штатный);
- положении рулей;
- вкл./выкл. моторов;
- направлении движения;
- текущем напряжении батареи;
- точке геолокации;
- технической исправности/неисправности САУ «Буран-В»;
- наличии напряжения питания 220 В;
- об авариях, зафиксированных индикаторами повреждений.

Передача информации между мобильным ПК с установленным ВПУ и блоком управления САУ «Буран-В» осуществляются через GSM- каналы связи.

В ходе проведения испытаний судно на водородном топливе управлялось при помощи двух джойстиков. На прототипе в рамках реальных испытаний была проверена технология электрохимического преобразования водородного топлива в электроэнергию на ВЭУ, необходимую для работы электромоторов, обеспечивающих перемещение судна. Проведенные испытания беспилотной роботизированной морской платформы с энергетической установкой на водородных топливных элементах (рис. 7) подтвердили её работоспособность в реальных условиях с непосредственным извлечением водорода на борту путем дегидрирования безопасного жидкого органического носителя водорода – гидрогенизированного ароматического соединения метилциклогексана в качестве источника водорода [10].

Обсуждение результатов

Беспилотная роботизированная морская платформа с энергетической установкой на водородных топливных элементах является экспериментальным водным транспортным средством, экологически чистым и безопасным [11]. В отличие от других энергетических установок, работающих на водородных ТЭ, принцип работы РМП-ВЭУ основывается на преобразовании химической энергии водорода в топливном элементе, полученным в процессе дегидрирова-

ния безопасного жидкого органического носителя водорода непосредственно на борту судна. В ходе испытаний протестирован режим беспилотного (дистанционного) управления по каналам спутниковой навигации мобильных каналов связи и видеоконтроля в реальных водных условиях. Беспилотная РМП-ВЭУ с дистанционным управлением может использоваться для мониторинга окружающей обстановки в прибрежных зонах озер и морей, а также как рабочий или туристический катер.

Выводы

В ходе исследования были проведены испытания беспилотной роботизированной морской платформы с энергетической установкой на водородных топливных элементах, которые подтвердили её работоспособность в реальных условиях с непосредственным извлечением водорода на борту путем дегидрирования безопасного жидкого органического носителя водорода – гидрогенизированного ароматического соединения метилциклогексана в качестве источника водорода. В ходе испытаний протестирован режим беспилотного (дистанционного) управления по каналам спутниковой навигации мобильных каналов связи и видеоконтроля в реальных водных условиях.

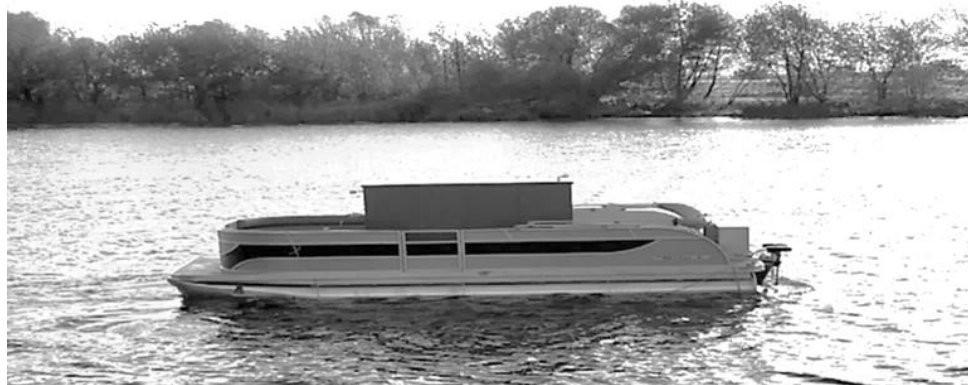


Рис. 7. Универсальный функциональный модуль морской энергетической установки на водородном топливе

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Автономная гибридная энергетическая система на основе солнечных преобразователей и водородных топливных элементов / Х.А.И. Исса, В.И. Велькин, Л.М.А. Абдали [и др.] // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2025. № 2(43). С. 36–46.
2. Декарбонизация энергетического сектора. Эксперты об экологических аспектах развития энергетики // В.Л. Червинский, Б.А. Якимович, О.А. Любчик [и др.] / Энергетические установки и технологии. 2024. Т. 10, № 2. С. 76–82.
3. Стационарные энергетические установки с топливными элементами: материалы, технологии, рынки // С.И. Бредихин, А.Э. Голодницкий, О.А. Дрожжин [и др.]. Москва : НТФ «Энергопрогресс», Корпорации «ЕЭЭК», 2017. 392 с.
4. Комбинированная система энергоснабжения на основе альтернативных источников энергии для судового оборудования // С.А. Конева, Е.В. Гусева, П.А. Бугаев [и др.] / Естественные и технические науки. 2024. № 11 (198). С. 207–210.
5. Papadias D.D., Peng J.K., Ahluwalia R.K. Hydrogen carriers: Production, transmission, decomposition, and storage // International Journal of Hydrogen Energy. 2021. № 46 (47). Pp. 24169–24189.
6. Management strategies for surplus electricity loads using electrolytic hydrogen / F. Gutierrez-Martín, J.M. García-De Mari, A. Baiñi, N. Laraqi // International journal of hydrogen energy. 2009. № 34. Pp. 8468–8475.

7. Насонов А.К., Панкратов М.И., Чурсин Ю.А. Разработка многофункционального безэкипажного катера промежуточного класса для работы с объектами различных типов // Молодежь и современные информационные технологии : сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, 3–7 декабря 2018 г. Томск, 2018. С. 342–343.
8. Системы резервного питания для судовых энергетических установок // А.С. Жильцов, В.П. Коломийченко, И.С. Ивантеев [и др.] // Естественные и технические науки. 2024. № 1(188). С. 230–233.
9. Технологическое развитие возобновляемой энергетики и новые возможности в области исследования и разработок // А.С. Комшин, Б.А. Якимович, Р.А. Нашев [и др.] // Энергетические установки и технологии. 2024. Т. 10, № 1. С. 64–67.
10. Stanislaus A., Cooper V.H. Aromatic Hydrogenation Catalysis: A Review // Catal. Reviews: Science and Eng. 1994. Vol. 36. Pp. 75–123.
11. Фролов В.Н., Севбо В.Ю., Ануфриев И.Е. Технологии без экипажного судовождения // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, экономике, практике. 2018. № 4(77). С. 17–21.

REFERENCES

1. Avtonomnaya gibridnaya energeticheskaya sistema na osnove solnechnykh preobrazovatelej i vodorodnykh toplivnykh elementov [Autonomous hybrid energy system on the basis of solar converters and hydrogen fuel elements] / H.A.I Issa, I.V. Velkin, L.M.A. Abdali [et al.] // Transport Aziatsko-Tihookeanskogo regiona 2025. № 2(43) S. 36–46.
2. Dekarbonizatsiya energeticheskogo sektora. Eksperty ob ekologicheskikh aspektah razvitiya energetiki [Decarbonization of the energy sector. Experts on ecological aspects of energetics' development] // V.L. Chervinskij, B.A.Yakimovich, O.A. Lyubchik [et al.] / Energeticheskie ustanovki i tehnologii. 2024. T. 10, № 2. S. 76–82.
3. Stacionarnye energeticheskie ustanovki s toplivnymi elementami: materialy, tehnologii, rynki [Stationary power installations with fuel elements: materials, technologies, markets] // S.I. Bredihin, A.E. Golodnickij, O.A. Drozhzhin [et al.] Moskva : NTF «Energoprogress», Korporacii «EEEK», 2017. 392 s.
4. Kombinirovannaya sistema energosnabzheniya na osnove alternativnykh istochnikov energii dlya sudovogo oborudovaniya // [Combined system of power supply on the basis of alternative power sources for vessel's equipment] S.A. Koneva, E.V. Guseva, P.A. Bugaev [et al.] / Estestvennye i tehnicheskie nauki. 2024. № 11 (198). S. 207–210.
5. Papadias D.D., Peng J.K., Ahluwalia R.K. Hydrogen carriers: Production, transmission, decomposition, and storage // International Journal of Hydrogen Energy. 2021. № 46(47). Pp. 24169–24189.
6. Management strategies for surplus electricity loads using electrolytic hydrogen / F. Gutie´rrez-Marti ´n, J.M. Garcı ´a-De Mari, A. Bai ´ri, N. Laraqi // International journal of hydrogen energy. 2009. № 34. Pp. 8468–8475.
7. Nasonov A.K., Pankratov M.I., Chursin Yu.A. Razrabotka mnogofunktsionalnogo bezekipazhnogo katera promezhutochnogo klassa dlya raboty s ob`ektami razlichnykh tipov [Development of a multi-functional unmanned launch of intermediary class for work with objects of various types] // Molodezh' i sovremennye informacionnye tehnologii: sbornik trudov XVI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodykh uchyonykh, 3–7 dekabrya 2018 g. Tomsk, 2018. S. 342–343.
8. Sistemy rezervnogo pitaniya dlya sudovykh energeticheskikh ustanovok [Backup power systems for vessels' power installations] // A.S Zhiltsov, V.P. Kolomijchenko, I.S. Ivanteev [et al.] / Estestvennye i tehnicheskie nauki. 2024. № 1(188). S. 230–233.
9. Tehnologicheskoe razvitie vozobnovlyaeмой energetiki i novye vozmozhnosti v oblasti issledovaniya i razrabotok [Technological development of renewable energetics and new opportunities in the area of research and development] / A.S. Komshin, B.A. Yakimovich, R.A. Nashev [et al.] // Energeticheskie ustanovki i tehnologii. 2024. T. 10, № 1. S. 64–67.
10. Stanislaus A., Cooper V.H. Aromatic Hydrogenation Catalysis: A Review // Catal. Reviews: Science and Eng 1994. Vol. 36. Pp. 75–123.
11. Frolov V.N., Sevbo V.Yu., Anufriev I.E. Tehnologii bez ekipazhnogo sudovozhdeniya [Technologies of unmanned vessel navigation] // Transport Rossijskoj Federacii. Zhurnal o nauke, ekonomike, praktike. 2018. № 4(77). S. 17–21.

Информация об авторах

А.С. Жильцов – аспирант кафедры «Энергетические системы и комплексы традиционных и возобновляемых источников»;
С.П. Муровский – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика»;
В.В. Кувшинов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетические системы и комплексы традиционных и возобновляемых источников»;
В.М. Цалоев – доцент кафедры «Судовое электрооборудование»;
И.Д. Артеменко – аспирант кафедры «Энергетические системы и комплексы традиционных и возобновляемых источников».

Информация об авторах

A.S. Zhiltsov – Post-graduate Student, Department of Energy Systems and Complexes of Traditional and Renewable Sources;
S.P. Murovsky – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Electrotechnics, Electronics and Electromechanics;
V.V. Kuvshinov – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Energy Systems and Complexes of Traditional and Renewable Sources;
V.M. Tsalojev – Associate Professor, Department of Marine Electrical Equipment;
I.D. Artemenko – Post-graduate Student, Department of Energy Systems and Complexes of Traditional and Renewable Sources.

Статья поступила в редакцию 10.09.2025; одобрена после рецензирования 29.10.2025; принята к публикации 29.10.2025.
The article was submitted: 10.09.2025; approved after reviewing: 06.06.2025; accepted for publication: 06.06.2025.

Научная статья
УДК 656.02
doi:10.31079/2415-8658-2025-4-54-57

КОНЦЕПЦИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ

Каменчуков Алексей Викторович¹, Пугачев Игорь Николаевич²

¹ Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия, 006641@togudv.ru

² Хабаровский Федеральный исследовательский центр ДВО РАН, Хабаровск, Россия
Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия, pugachev64@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются вопросы, связанные с реализацией транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 г., с прогнозом на период до 2035 г. Задачи по прогнозированию и мониторингу эксплуатационного состояния дорожных покрытий во времени до настоящего времени не имеют однозначного решения. Предлагается концептуальный подход к решению задач мониторинга и прогнозирования качества дорожных покрытий. Предложена модель, основанная на совместности и неделимости стадий жизненного цикла дорожной конструкции: проектирования, строительства и эксплуатации. Выделены основные элементы и особенности каждой стадии для решения задачи прогнозирования эксплуатационного состояния дорожного покрытия по критериям прочности и ровности. Основные положения концепции обоснованы и сопоставимы с результатами других исследователей. Сделаны выводы о целесообразности и эффективности предлагаемых решений.

Ключевые слова: автомобильная дорога, покрытие, эксплуатационное состояние, качество

Original article

THE CONCEPT OF FORECASTING THE OPERATIONAL CONDITION OF ROAD SURFACES

Kamenchukov Aleksey V.¹, Pugachev Igor N.²

¹ Pacific National University, Khabarovsk, Russia, 006641@togudv.ru

² Khabarovsk Federal Research Center FEB RAS, Khabarovsk, Russia
Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia, pugachev64@mail.ru

Abstract. The article discusses issues related to the implementation of the transport strategy of the Russian Federation until 2030, with a forecast for the period up to 2035. The tasks of forecasting and monitoring the operational condition of road surfaces over time are the most significant for the development of the country's economy, but so far they have not had a uniform solution. The authors propose a conceptual approach to solving the problems of monitoring and forecasting the quality of road surfaces. A model is proposed based on the compatibility and indivisibility of the three stages of the life cycle of a road structure: design, construction and operation. The main elements and features of each stage are highlighted to solve the problem of predicting the operational condition of the pavement according to the criteria of strength and evenness. The main provisions of the concept are substantiated and they are comparable with the results of other researchers. Conclusions are drawn about the expediency and effectiveness of the proposed solutions.

Keywords: motor road, surface, operational condition, quality

Автомобильная дорога – сложное инженерно-техническое сооружение. Эксплуатационное состояние элементов автомобильных дорог не является постоянной характеристикой и изменяется в процессе эксплуатации сооружения под воздействием факторов внешней среды [1–3]. Основным элементом автомобильной дороги, отвечающим за качество и безопасность движения транспортных средств, перевозку грузов и пассажиров, является дорожное покрытие. Прочность и ровность покрытия – это основные эксплуатационные свойства, по которым оценивается качество и безотказность работы сооружения [1, 4].

Анализ нормативной документации, а также исследований отечественных и зарубежных ученых показал, что нет однозначного подхода к прогнозированию эксплуатационного состояния дорожных покрытий [5–8]. Тем не менее согласно транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 г., с прогнозом на период до 2035 г. (распоряжение Правительства РФ от 27 ноября 2021 г. № 3363-р), прогнозирование и мониторинг эксплуатационного состояния дорожных покрытий во времени является основной и наиболее значимой задачей организаций по содержанию и эксплуатации дорог всех уровней.

Поскольку единая методика прогнозирования и мониторинга эксплуатационного состояния дорожных покрытий во времени отсутствует, авторами

была сформулирована концепция, направленная на решение данной задачи, которая заключается в следующих положениях.

1. Формирование единого методологического подхода к мониторингу и оценке состояния дорожных покрытий по критериям прочности и ровности.

2. Учет многостадийности процессов формирования показателей эксплуатационного состояния дорожных покрытий.

3. Учет эксплуатационных особенностей участков мониторинга при прогнозировании эксплуатационного состояния дорожных покрытий.

4. Своевременность проведения мероприятий по поддержанию нормативного эксплуатационного состояния элементов автомобильной дороги.

На первый взгляд, данные положения могут показаться очевидными и простыми, но из-за разнообразности и обширности нашей страны их выполнение сопряжено с рядом трудностей. Основным препятствием является именно объёмность территорий, не позволяющая выполнять работы по стандартным методам диагностики и мониторинга состояния элементов автомобильной дороги. Процессы, которые развиваются в дорожной одежде и земляном полотне под воздействием природно-климатических факторов и от транспортной нагрузки, требуют определенного времени, но мониторинг с периодичностью 1–2 раза в год не позволяет своевременно их выявить и среагировать для минимизации ущерба.

Для реализации концептуального подхода по прогнозированию и мониторингу эксплуатационного состояния дорожных покрытий предлагается выделить три стадии жизненного цикла дорожной конструкции.

I стадия: изыскания и проектирование, направленные на прогнозирование потребительских свойств объекта строительства, а также оптимизацию решений по множеству критериев.

II стадия: строительство или реконструкция, направленные на формирование физических и потребительских свойств дороги.

III стадия: эксплуатация, направленная на сохранение и поддержание свойств дороги на протяжении расчетного срока службы.

Стадия проектирования является базовой, направленной на принятие решений по обеспечению надежности, долговечности и безопасности дорожной конструкции во время эксплуатации. От качества и полноты исходных данных, полученных в результате инженерных изысканий, от опыта инженера-проектировщика, способного учесть все внешние факторы при проектировании, зависит дальнейшая успешность эксплуатации дороги.

Особое значение при проектировании и строительстве дорог необходимо уделять водно-тепловому режиму земляного полотна и правильному учету источников увлажнения при конструировании дорожной одежды. Многочисленные исследования показывают [2, 9, 10], что именно влажности дисперсных грунтов рабочего слоя земляного полотна и слоев дорожной одежды влияют на итоговую

способность дорожной одежды сопротивляться воздействию транспортной нагрузки и сохранять свою прочность по критериям упругого прогиба, сдвигустойчивости и растяжению при изгибе.

Стадия строительства автомобильной дороги направлена на обеспечение процесса формирования физических свойств и геометрических очертаний элементов дорожной конструкции, а также создание и введение в строй элементов, отвечающих за безопасность и надежность работы в процессе эксплуатации всех элементов конструкции. Именно на этой стадии формируются физико-механические свойства и характеристики материалов и грунтов основания дороги, слоев земляного полотна (рабочего и основных), слоев дорожной одежды. Однако, в связи со спецификой проектирования и строительства линейных объектов большой протяженности, не всегда возможно обеспечить однородность условий строительства и эксплуатации объекта. В первую очередь это может быть обусловлено следующим:

- изменчивостью инженерно-геологических условий, т.е. возникновением участков с залеганием неучтенных грунтов, которые могут негативно сказаться на конструкции земляного полотна и дорожной одежды;

- неравномерностью промерзания и оттаивания земляного полотна;

- неоднородностью или изменчивостью условий увлажнения земляного полотна и основания автомобильной дороги;

- неоднородностью составов и физико-механических (прочностных) характеристик используемых дорожно-строительных материалов.

Оценка качества строительства, в соответствии с требованиями ГОСТ Р 59120, выполняется по прочности дорожного покрытия по критерию упругого прогиба, при этом расхождения между проектами и фактическими значениями (в меньшую сторону) в расчетный период должны быть не более 5%. Обеспечение полного соответствия между проектным модулем упругости дорожной одежды и фактическим, обеспеченным после устройства всех конструктивных слоев, позволяет прогнозировать эксплуатационное состояние дорожной одежды по критерию прочности и ровности.

На стадии эксплуатации решаются две принципиальные задачи.

1. Динамический контроль за изменениями факторов внешней среды, которые влияют на прочность и долговечность дорожного покрытия.

2. Контроль и прогнозирование изменений показателей прочности и ровности для своевременной разработки плана мероприятий по содержанию и ремонту дорожного покрытия.

Современные способы диагностики и паспортизации автомобильных дорог не позволяют осуществлять контроль за изменением эксплуатационного состояния дорожного покрытия в режиме реального времени. Перспективными методами для

решения поставленных задач являются методы дистанционного (непрямого) контроля за состоянием дорожного покрытия, методы фотовидеофиксации состояния дорожного покрытия и участников дорожного движения. В настоящее время стационарные пункты (точки) фотовидеофиксации наиболее часто применяются на городских дорогах для выполнения следующих функций:

– мониторинга и контроля скорости движения транспортных средств;

– мониторинга состояния дорожной разметки, дорожных знаков и иных элементов дорожной инфраструктуры;

– мониторинга дефектов дорожного покрытия в виде трещин и выбоин.

На автомобильных дорогах вне населенных пунктов контроль и непрерывный мониторинг скорости транспортных средств является эффективной мерой, в связи с небольшой вариативностью движения на участках значительной протяженности (5, 10, 15 и более километров). Такой контроль можно устраи-

вать, используя стационарные камеры фото- и видеодетекции, считывающие скорость и время прохождения транспортного средства через пункт контроля.

Систематические измерения скорости движения, с учетом факторов окружающей среды и непредвиденных ситуаций, с достаточно большой долей вероятности позволяют сделать вывод о качестве и состоянии дорожного покрытия. Настоящее предположение подтверждается исследованиями авторов [11, 12, 16–18] и других отечественных и зарубежных исследователей [13–15].

Таким образом можно говорить о том, что разработка концепции прогнозирования и мониторинга эксплуатационного состояния дорожного покрытия не может рассматриваться как задача, решаемая только на стадии содержания и эксплуатации автомобильных дорог. Для того чтобы решения были взвешенными, обоснованными и эффективными, необходимо рассматривать все основные стадии жизненного цикла дорожной конструкции.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Оценка надежности дорожной одежды на стадии эксплуатации / А.Н. Тиратуриян, А.А. Симакова, И.В. Бодров, М.В. Фарниева // Инженерный вестник Дона. 2017. № 4. URL : ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4509 (дата обращения: 12.10.2025).
2. Лакей В.Н., Ленченкова Ю.В. Анализ причин возникновения трещин в дорожных покрытиях и критерии их трещиностойкости // Матрица научного познания. 2019. № 4. С. 68–73.
3. Каменчуков А.В., Ярмолинский В.А., Лопашук В.В. Сезонные изменения прочности дорожных одежд // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 11-4(53). С. 68–72.
4. Повышение надежности автомобильных дорог / И.Л. Золотарь, В.К. Некрасов, Ю.М. Яковлев, М.С. Коганзон. Москва : Транспорт, 1977. 183 с.
5. Алексиков С.В., Лескин А.И., Гофман Д.И. Прогнозирование колеиности дорожного покрытия региональных дорог Нижнего Поволжья // Дороги и мосты. 2020. № 2(44). С. 115–126.
6. Горячев М.Г. Моделирование роста удельной энтропии и остаточных деформаций в нежестких дорожных одеждах // Наука и техника в дорожной отрасли. 2015. № 2(72). С. 29–30.
7. Kleveko V.I. Model and Field experimental studies of reinforced clay bases // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1928. P. 012032. doi:10.1088/1742-6596/1928/1/012032
8. Kamenchukov A.V., Yarmolinskii V.A. Integrated efficiency assessment of road reconditioning // Construction of Unique Buildings and Structures. 2017. № 7(58). P. 7–17.
9. Олехнович В.П. Разработка эффективных конструкций и технологий строительства, реконструкции и ремонта дорожных одежд под тяжелое и интенсивное движение // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2008. № 1(18). С. 153–156.
10. Слободянюк М.Э., Нечаев Г.И. Повышение надежности несущего слоя дорожных одежд // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Дала. 2019. № 6(24). С. 203–211.
11. Каменчуков А.В., Пугачев И.Н. Перспективные методы оценки качества и безопасности дорожного движения // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 1-4(55). С. 72–75.
12. Комплексный подход к повышению безопасности дорожного движения на основе анализа транспортно-эксплуатационного состояния автомобильной дороги / И.Н. Пугачев, А.В. Каменчуков, В.А. Ярмолинский, Н.Г. Шешера // Дороги и мосты. 2018. № 1(39). С. 266–282.
13. Vyas V., Singh A.P., Srivastava A. Prediction of asphalt pavement condition using FWD deflection basin parameters and artificial neural networks // Road Materials and Pavement Design. 2021. Vol. 22. Issue 12. P. 2748–2766.
14. An intelligent decision-making framework for asphalt pavement maintenance using the clustering-PageRank algorithm / C. Han, M. Fang, T. Ma [et al.] // Engineering Optimization. 2020. Vol. 52. Issue 11. P. 1829–1847.
15. Тиратуриян А.Н. Моделирование управляющих воздействий на эксплуатационной стадии жизненного цикла автомобильных дорог // Вестник МГСУ. 2024. № 19(1). С. 115–127.
16. Kamenchukov A., Pugachev I., Yarmolinsky V. Evaluation of road repair efficiency in terms of ensuring traffic quality and safety // Transportation Research Procedia, Saint Petersburg, 27–29 сентября 2018 года. Vol. 36. Saint Petersburg : Elsevier B.V., 2018. P. 627–633. EDN: KZFBZM. doi:10.1016/j.trpro.2018.12.142
17. Improving the criteria for determining dates of repair of highways / A. Kamenchukov, I. Pugachev, A. Yarmolinsky [et al.] // Journal of Applied Engineering Science. 2019. Vol. 17, № 1. P. 81–86. EDN: PEEGPS. doi:10.5937/jaes17-19419
18. Digitalization of the Northern Sea Route as a Key Phase for Improvement of Arctic Regions Accessibility / I. Pugachev, A. Ostapenko, D. Kapskiy, A. Kamenchukov // International Conference on Engineering Management of Communication and Technology, Vienna, Austria, 20–22 октября 2022 года. New York : Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2022. P. 1–6. EDN: YDTETO. doi:10.1109/EMCTECH55220.2022

REFERENCES

1. Ocenka nadezhnosti dorozhnoj odezhdly na stadii ekspluatatsii [Assessment of road structure reliability at operation stage] / A.N. Tiratyurian, A.A. Simakova, I.V. Bodrov, M.V. Farnieva // *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2017. № 4. URL : ivdon.ru/magazine/archive/n4y2017/4509 (data obashcheniya: 12.10.2025).
2. Lakey V.N., Lenchenkova Yu.V. Analiz prichin voznikoveniya treshhin v dorozhnykh pokrytyakh i kriterii ikh treshhinostojkosti [Analysis of crack formation causes in road coverings and their crack resistance criteria] // *Matritsa nauchnogo poznaniya*. 2019. № 4. S. 68–73.
3. Kamenshchukov A.V., Yarmolinsky V.A., Lopashuk V.V. Sezonnnye izmeneniya prochnosti dorozhnykh odezhd [Seasonal changes in strength characteristics of road structures] // *Mezhdunrodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*. 2016. № 11-4(53) S. 68–72.
4. Povyshenie nadezhnosti avtomobil'nykh dorog [Improving the reliability of automobile roads] / I.L. Zolotar, V.K. Nekrasov, Yu.M. Yakovlev, M.S. Koganzon. Moskva : Transport, 1997. 183 s.
5. Alexikov S.V., Leskin A.I., Gofman D.I. Prognozirovaniye koleynosti dorozhnogo pokrytiya regional'nykh dorog Nizhnego Povolzh'ya [Forecasting rutting of regional roads' surface in Lower Volga region] // *Dorogi i mosty*. 2020. № 2(44). S. 115–126.
6. Goryachev M.G. Modelirovaniye rosta udel'noj entropii i ostatochnykh deformacij v nezhestkikh dorozhnykh odezhdakh [Simulation of specific entropy growth and residual deformations in flexible road layers] // *Nauka i tekhnika v dorozhnoj otrasli*. 2015. № 2(72). S. 29–30.
7. Kleveko V.I. Model and field experimental studies of reinforced clay bases // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1928. P. 012032. doi:10.1088/1742-6596/1928/1/012032
8. Kamenchukov A.V., Yarmolinskii V.A. Integrated efficiency assessment of road reconditioning // *Construction of Unique Buildings and Structures 2017* № 7(58) pp. 7–17.
9. Olekhovich V.P. Razrabotka effektivnykh konstrukcij i tekhnologij stroitel'stva, rekonstrukcii i remonta dorozhnykh odezhd pod tyazholoe i intensivnoe dvizheniye [Development of effective designs and technologies for construction, reconstruction and repair of road surfaces under heavy traffic conditions] // *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2008. № 1(18). S. 153–156.
10. Slobodyanyuk M.E., Nechaev G.I. Povyshenie nadezhnosti nesushhego sloya dorozhnykh odezhd [Enhancing the reliability of load-bearing layer of roadways] // *Vestnik Luganskogo natsional'nogo universiteta imeni Vladimira Dalya*. 2019. № 6(24) S. 203–211.
11. Kamenshchukov A.V., Pugachev I.N. Perspektivnye metody ocenki kachestva i bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya [Promising methods for assessing quality and safety of road transport] // *Mezhdunrodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*. 2017. № 1-4(55). S. 72–75.
12. Kompleksnyj podkhod k povysheniyu bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya na osnove analiza transportno-ekspluatatsionnogo sostoyaniya avtomobil'noj dorogi [A comprehensive approach to improving road traffic safety based on analysis of transportation performance status of automobile road] / I.N. Pugachev, A.V. Kamenshchukov, V.A. Yarmolinsky, N.G. Sheshera // *Dorogi i mosty*. 2018. № 1(39). S. 266–282.
13. Vyas V., Singh A.P., Srivastava A. Prediction of Asphalt Pavement Condition Using FWD Deflection Basin Parameters and Artificial Neural Networks // *Road Materials and Pavement Design*. 2021. Vol. 22. Issue 12. Pp. 2748–2766.
14. An intelligent decision-making framework for asphalt pavement maintenance using clustering-PageRank algorithm / C. Han, M. Fang, T. Ma [et al.] // *Engineering Optimization*. 2020. Vol. 52. Issue 11. Pp. 1829–1847.
15. Tiratyurian A.N. Modelirovaniye upravlyayushchikh vozdeystvij na ekspluatatsionnoj stadii zhiznennogo tsikla avtomobil'nykh dorog [Modeling control actions during exploitation stage of automobile road life cycle] // *Vestnik MGSU*. 2024. № 19(1) S. 115–127.
16. Kamenchukov A., Pugachev I., Yarmolinsky V. Evaluation of road repair efficiency in terms of ensuring traffic quality and safety // *Transportation Research Procedia*, Saint Peterburg, 27–29 sentyabrya 2018 goda. Vol. 36. Saint Petersburg : Elsevier B.V., 2018. P. 627–633. EDN: KZFBZM. doi:10.1016/j.trpro.2018.12.142
17. Improving the criteria for determining dates of repair of highways / A. Kamenchukov, I. Pugachev, A. Yarmolinsky [et al.] // *Journal of Applied Engineering Science* 2019. Vol. 17, No. 1 P. 81–86. EDN: PEEGPS. doi: 10.5937/jaes17-19419
18. Digitalization of the Northern Sea Route as a Key Phase for Improvement of Arctic Regions Accessibility / I. Pugachev, A. Ostapenko, D. Kapskiy, A. Kamenchukov // *International Conference on Engineering Management of Communication and Technology*, Vienna, Austria, 20–22 oktyabrya 2022 goda. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2022 P. 1–6. EDN: YDTETO. doi:10.1109/EMCTECH5220.2022

Информация об авторах

А.В. Каменчуков – кандидат технических наук, доцент, высшая школа транспортного строительства, геодезии и землеустройства;

И.Н. Пугачев – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Изыскания и проектирование железных и автомобильных дорог».

Information about the authors

A.V. Kamenchukov – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Higher School of Transport Construction, Geodesy and Land Management;

I.N. Pugachev – Doctor of Science (Engineering), Professor, Professor of the Department of Research and Design of Railways and Highways.

Статья поступила в редакцию 01.11.2025; одобрена после рецензирования 01.12.2025; принята к публикации 01.12.2025.
The article was submitted: 01.11.2025; approved after reviewing: 01.12.2025; accepted for publication: 01.12.2025.

Научная статья
УДК 629.4.053.3
doi:10.31079/2415-8658-2025-4-58-67

ИССЛЕДОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ЭЛЕКТРОПОЕЗДА ПРИ СЛУЧАЙНОМ ВОЗМУЩЕНИИ

Легкая Валерия Игоревна

Российский университет транспорта, Москва, Россия, tiger.rut@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрена структура системы автоматического управления скоростью электропоезда. В качестве закона управления использован пропорционально-интегральный закон с прогнозом рассогласования и переменной в зависимости от режима движения структурой. При моделировании измерительного тракта системы учтено наличие методической погрешности, вследствие чего в структуру включен фильтр низких частот Баттерворта 5-го порядка. Определена совокупность показателей качества. Рассмотрена методика моделирования случайного возмущения, значительно влияющего на качество процесса управления скоростью и представляющего собой переменный профиль пути. Выполнен анализ полученной в ходе моделирования реализации случайной функции $i(s)$, рассмотрены ее статистические параметры и нормальный характер распределения значений уклонов. Проведено моделирование работы системы автоматического управления скоростью при движении электропоезда по случайному переменному профилю пути, по результатам которого осуществлена оценка работоспособности предлагаемой структуры системы.

Ключевые слова: цифровые автоматические системы управления, качество управления, стационарный случайный процесс, имитационное моделирование, скоростной электропоезд, фильтр Баттерворта, пропорционально-интегральный закон управления, нормальное распределение

Original article

INVESTIGATION OF AN ADAPTIVE AUTOMATIC TRAIN SPEED CONTROL SYSTEM IN CASE OF RANDOM DISTURBANCE

Legkaya Valeriya I.

Russian University of Transport, Moscow, Russia, tiger.rut@yandex.ru

Abstract. The structure of the automatic speed control system of an electric train is considered. The proportional-integral law with a forecast of misalignment and a variable structure depending on the mode of movement is used as the control law. When modeling the measuring path of the system, the presence of a methodological error was taken into account, as a result of which a 5th-order Butterworth low-pass filter was included in the structure. A set of quality indicators has been determined. A technique for modeling a random disturbance, which significantly affects the quality of the speed control process and represents a variable path profile, is considered. The analysis of the implementation of the random function $i(s)$ obtained during modeling is carried out, its statistical parameters and the normal distribution of slope values are determined. A simulation of the operation of an automatic speed control system when an electric train is moving along a random variable track profile has been carried out, and based on its results, an assessment of the operability of the proposed system structure has been carried out.

Keywords: digital automatic control systems, control quality, stationary random process, simulation modeling, high-speed electric train, Butterworth filter, proportional-integral control law, normal distribution

В настоящее время одним из путей развития скоростного пассажирского подвижного состава является разработка и совершенствование интеллектуальных транспортных систем (ИТС) для контроля и управления движением [1]. Использование ИТС помимо повышения безопасности движения поездов позволит улучшить их энергетические показатели. При этом безопасность движения обеспечивается за счет точного соблюдения ограничений, накладываемых на скорость движения со стороны систем интервального регулирования движения поездов, а также систем безопасности; снижение расхода электроэнер-

гии достигается путём выбора рациональной с точки зрения минимизации расхода энергии траектории движения. Все это реализуется одной из управляющих подсистем ИТС – системой автоведения поездов (САВП). В ее структуру входит система автоматического управления (САУ) скоростью, обеспечивающая достижение уровня заданной скорости и ее поддержание при следовании в режиме стабилизации.

Качество управления скоростью зависит от структуры используемой САУ, закона управления и его параметров, а также от возможности САУ адаптироваться к изменению параметров объекта управления,

например, загруженности электропоезда пассажирами или к изменению режимов движения.

Отличием предлагаемой модели САУ скоростного электропоезда (рис. 1) от САУ предшественников [2, 3] является учёт при её разработке методической погрешности тракта измерения скорости. Также особенностью данной САУ является адаптивная структура закона управления, обеспечивающая высокое качество процесса регулирования скорости [4].

Рассмотрим более подробно функциональную схему САУ скоростью. Объектом управления является скоростной электропоезд. Для проведения имитационного моделирования движения электропоезда, в том числе при движении по переломам профиля пути и при различной загруженности вагонов пассажирами, использована многомассовая модель поезда, каждый из вагонов которого пред-

ставлен системой дифференциальных уравнений второго порядка [5]. Модель поезда дополнена моделью межвагонной связи, описывающей работу резинометаллического поглощающего аппарата.

Информация о заданной скорости поступает в САУ с контроллера машиниста ЗУv (сигнал v_{31}) и из контура регулирования времени хода системы автовведения АВ (сигнал v_{32}). Устройство ИЛИ-*min1* обеспечивает выбор сигнала v_3 , соответствующего минимальной скорости, из поступивших на его вход сигналов. Полученный сигнал v_3 поступает в промежуточное устройство ПУ1, обеспечивающее плавное изменение v_3 в соответствии с системой уравнений, в которой темп изменения определяется заданным устройством ЗУa ускорением $a_3 = 0,64 \text{ м/с}^3$:

$$\begin{cases} \text{если } v_3[nT] > v_3[(n-1)T], \text{ то} \\ v_{3и}[nT] = \begin{cases} v_3[(n-1)T] + a_3 \varepsilon T, & \text{если } v_3[(n-1)T] + a_3 \varepsilon T < v_3[nT]; \\ v_3[nT], & \text{если } v_3[(n-1)T] + a_3 \varepsilon T \geq v_3[nT] \end{cases}; \\ \text{если } v_3[nT] < v_3[(n-1)T], \text{ то} \\ v_{3и}[nT] = \begin{cases} v_3[(n-1)T] - a_3 \varepsilon T, & \text{если } v_3[(n-1)T] - a_3 \varepsilon T > v_3[nT]; \\ v_3[nT], & \text{если } v_3[(n-1)T] - a_3 \varepsilon T \leq v_3[nT] \end{cases}. \end{cases}$$

Устройство сравнения УС вычисляет рассогласование Δv между скоростями, соответствующими плавно изменяющейся заданной $v_{3и}$ и отфильтрованной от погрешности измерения скорости $v_{изм}$, поступившей с измерительного устройства. Вычисленное рассогласование Δv поступает на вход устройства управления УУ.

Устройство управления формирует величину заданной силы тяги $F_{зад}$ или торможения $B_{зад}$ в соответствии с принятым законом. Согласно ранее проводимым исследованиям [6], в качестве закона управления использован пропорционально-инте-

гральный закон с прогнозом рассогласования и переменной структурой:

$$F_{зад}[nT] = k_1 \Delta v [nT] + \frac{1}{k_2} \sum_{i=0}^n \Delta v_i T + k_3 f_3 [nT],$$

где k_1, k_2, k_3 – коэффициенты при пропорциональной, интегральной и прогнозной частях закона управления; $f_3 [nT]$ – прогнозируемая в момент времени $t = nT$ величина рассогласования скорости в следующий момент времени $\Delta v [(n+1)T]$; M – количество отсчетов, используемых экстраполятором при работе.

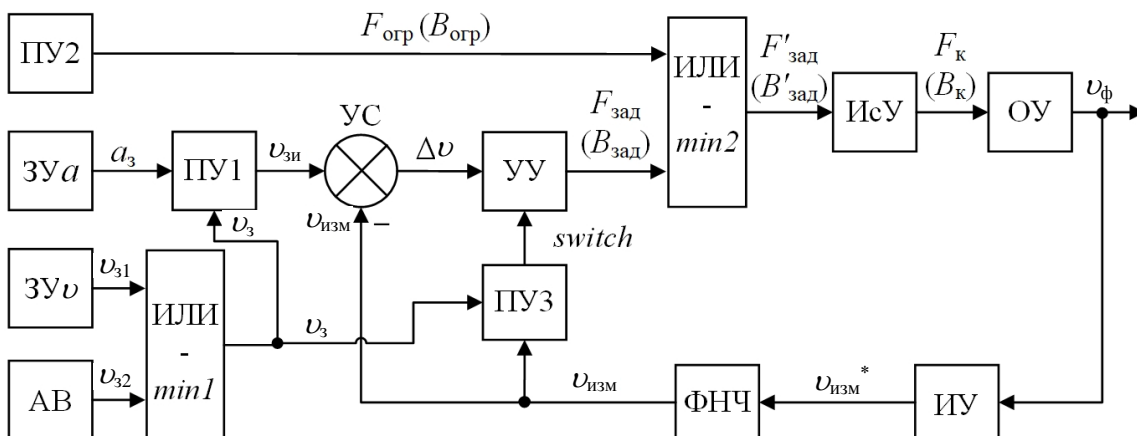


Рис. 1. Функциональная схема САУ скоростью электропоезда

Использование переменной структуры закона управления повышает качество регулирования скорости за счет включения в работу составляющих закона в зависимости от режима движения. В переходных режимах движения (разгон, торможение) используется только пропорциональная P^* составляющая закона; в режиме стабилизации скорости помимо пропорциональной в работу включаются интегральные с прогнозом рассогласования IE^* составляющие. Момент переключения P^* -модификации закона управления на модификацию $P^* + IE^*$ осуществляется в момент начала выполнения усло-

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta v_1[nT] = |v_{изм}[nT] - v_3[nT]|; \\ switch = \begin{cases} 0, & \text{если } \Delta v_1[nT] > 2; \\ 1, & \text{если } \Delta v_1[nT] \leq 2; \end{cases} \\ P^*[nT] = k_1 \Delta v[nT]; \\ IE^*[nT] = \begin{cases} \frac{1}{k_2} \sum_{i=0}^n \Delta v_i T + k_3 f_3[nT], & \text{если } switch = 1; \\ 0, & \text{если } switch = 0; \end{cases} \\ F_{зад}[nT] = P^*[nT] + IE^*[nT]. \end{array} \right.$$

Выходной сигнал с УУ, определяющий заданную силу тяги $F_{зад}$ или торможения $B_{зад}$, поступает в устройство ИЛИ-*min2*, на вход которого также поступает сигнал $F_{огр}$ ($B_{огр}$) с устройства ограничения тяговых характеристик ПУ2. В данном устройстве осуществляется выбор сигнала $F'_{зад}$ ($B'_{зад}$), соответствующего значению минимальной силы тяги или торможения, между заданным с УУ сигналом и накладываемыми ограничениями. Далее сигнал $F'_{зад}$ ($B'_{зад}$) поступает на вход исполнительного устройства ИСУ, представляющего собой тяговый привод электропоезда, математическая модель которого описывается как апериодическое звено с постоянной времени $T_{т.э.п} = 1,28$ с [7].

На качество регулирования скорости помимо закона управления значительное влияние оказывает процесс измерения скорости, результат которого поступает в САУ. При разработке структуры САУ в качестве измерительного устройства был принят датчик скорости с частотно-импульсной модуляцией. Формирование значения скорости осуществляется путем подсчета импульсов за эталонный интервал времени [8]:

$$v_{и} = \frac{s_0 N}{T},$$

где $v_{и}$ – измеренное значение скорости; s_0 – расстояние, соответствующее длине дуги окружности

вий $v_{изм} \geq (v_3 - 2)$ км/ч (в случае разгона) или $v_{изм} \leq (v_3 + 2)$ км/ч (в случае торможения).

Переключение модификаций закона управления в УУ осуществляется в соответствии с поступающим на его вход сигналом *switch* с устройства ПУ3, в котором происходит вычисление рассогласования Δv_1 между измеренной отфильтрованной $v_{изм}$ и заданной v_3 скоростями с дальнейшим его сравнением с величиной, равной 2 км/ч. Реализация выбора модификации закона управления описывается следующей системой уравнений:

поверхности катания колеса, которое проходит электропоезд за время между двумя импульсами N .

Данный способ измерения характеризуется наибольшей величиной методической погрешности, максимальное значение которой соответствует величине шага квантования по уровню:

$$\Delta v_{max} = q = 3,6 \frac{2\pi R}{zT_{и}} = 2,47 \text{ км/ч},$$

где R – радиус бандажа колесной пары по кругу катания, $R = 0,46$ м; z – число импульсов, вырабатываемых за один оборот колеса, $z = 42$; $T_{и}$ – шаг временной дискретизации, $T_{и} = 0,1$ с.

Принято, что методическая погрешность Δv_m при данном способе измерения распределена в соответствии с треугольным законом в диапазоне $[-2,47; 2,47]$ [8]. Для этого проведено моделирование погрешности с использованием метода обратных функций [9, 10] (см. рис. 2).

Таким образом, значение измеренной скорости определяется как

$$v_{изм}^*[nT] = \frac{1}{T} \int_{(n-1)T}^{nT} v_{ф}(t) dt + \Delta v_m[nT],$$

где t – текущее время; $v_{ф}$ – фактическая скорость движения поезда.

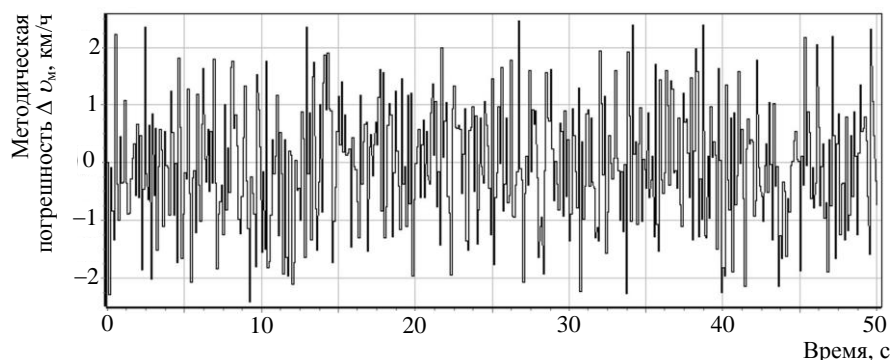


Рис. 2. Результат моделирования методической погрешности измерения

Характер протекания переходного процесса в контуре управления тяговым приводом существенно зависит от характера изменения рассогласования Δv , поступающего на вход УУ. По результатам пробных расчетов установлено, что наличие высокочастотной составляющей методической погрешности в сигнале измеренной скорости отрицательно влияет на процесс управления: на выходе УУ формируется недопустимое по условиям работы тягового привода знакопеременное колебательное изменение значения заданной силы тяги.

Для снижения влияния погрешности измерения на качество процесса регулирования скорости в структуру САУ включен фильтр низких частот ФНЧ, установленный после измерительного устройства. Выбор фильтра осуществлялся в соответствии с требованиями к виду его амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) при различных порядках. В ходе многочисленных расчетов установлено, что наилучшие результаты работы САУ достигаются при использовании фильтра Баттерворта 5-го порядка [11]. АЧХ данного фильтра характеризуется неизменностью сигнала на частотах полосы пропускания и монотонностью убывания сигнала со скоростью -100 дБ/дек на частотах, превышающих установленную частоту среза (рис. 3).

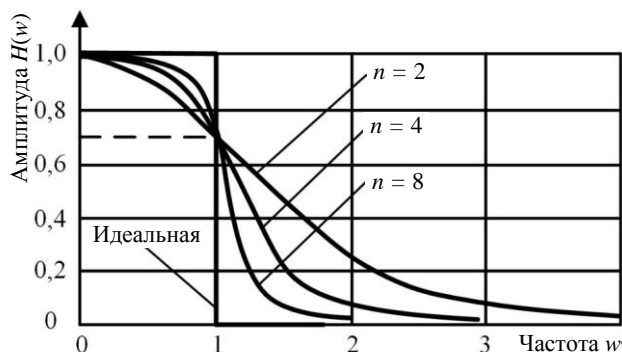


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики фильтра Баттерворта различных порядков

САУ должна быть устойчивой, а также выполнять требования к качеству управления. Использована следующая совокупность показателей для оценки качества регулирования [12]: вид переходного процесса; время регулирования $t_{\text{рег}}$; перерегулирование σ (на данный показатель накладывается ограничение по максимально допустимому значению $[\sigma] = 1$ км/ч); величина квадратичной интегральной ошибки $I_{2\text{уст}}$, оценивающая точность регулирования скорости при движении в режиме стабилизации.

Отметим, что для достижения удовлетворительных результатов при управлении скоростным электропоездом кроме разработанной структуры САУ, учитывающей погрешность измерения, необходимо осуществить выбор рациональных значений параметров САУ, таких как k_1 , k_2 , k_3 , M , являющихся параметрами закона управления, и частоты среза $\omega_{\text{ср}}$ фильтра Баттерворта 5-го порядка. Значения параметров были выбраны в ходе экспериментальных расчетов и составляют $k_1 = 60000$, $k_2 = 0,0001$, $k_3 = 20000$, $M = 25$, $\omega_{\text{ср}} = 6,3$ Гц.

Для проверки эффективности предлагаемой автором структуры проведено имитационное моделирование работы САУ при движении электропоезда по переменному профилю пути. Выбор условий моделирования обоснован наличием возмущения (переменного профиля пути), значительно влияющего на качество процесса регулирования скорости в режиме стабилизации (в том числе на показатели качества), что позволит осуществить оценку работы САУ в условиях, близких к условиям в эксплуатации. При следовании электропоезда по крутым спускам и подъемам в режиме стабилизации скорости установленные ранее показатели качества должны принимать допустимые значения.

Ранее была разработана методика анализа функционирования САУ при случайном возмущении [13, 14], в соответствии с которой переменный профиль пути представляет собой случайную функцию $i(s)$ с заданными статистическими параметрами – автокорреляционной функцией $R(s)$ и спектральной плотностью $S(\omega)$:

$$R(s) = \sigma_s^2 e^{-\alpha|s|};$$

$$S(w) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \sigma_s^2 e^{-\alpha|s|} ds = \frac{2\sigma_s^2 \alpha}{w^2 + \alpha^2},$$

где $\sigma_s^2 = R(s=0)$ – дисперсия случайного процесса; α – показатель статистической связи отсчетов случайной функции; s – независимая переменная.

Данная функция $i(s)$ является результатом преобразования сигнала с выхода генератора белого шума при помощи формирующего фильтра. Выбор фильтра обусловлен требуемой частотной характеристикой (ЧХ), определенной в ходе операции факторизации спектральной плотности случайного процесса и обеспечивающей на его выходе сигнал с заданными $R(s)$ и $S(w)$ [14]. По результатам проведенного анализа установлено, что ЧХ формирующего фильтра соответствует ЧХ инерционного звена 1-го порядка, амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) которого равна:

$$A_\phi(w) = \frac{k_\phi}{\sqrt{1 + T_\phi^2 w^2}}.$$

Таким образом, формирующий фильтр представляет собой сочетание усилительного звена и фильтра Баттворта 1-го порядка. Параметрами фильтра, полученного в ходе преобразований, являются коэффициент усиления k_ϕ и параметр $T_\phi = \frac{1}{\alpha}$, в котором α соответствует частоте среза фильтра w_{cp} и принимается равным $\alpha = 0,492$ Гц согласно [15]. Коэффициент усиления определяет значения уклонов профиля пути, получаемых в процессе моделирования функции $i(s)$, вследствие чего при разработке методики моделирования случайного профиля пути принято решение о произвольном выборе значения данного параметра в зависимости от поставленных при моделировании задач. В рамках данной работы значение параметра принимается $k_\phi = 40$.

Моделирование переменного профиля пути как случайной функции $i(s)$ осуществляется в программной среде LabVIEW. В начале проведения расчетов задаются значения параметров моделируемого участка пути, а именно его общая протяжен-

ность и длина каждого из элементов, в данной работе составляющих 150 и 0,02 км.

Полученная реализация случайного профиля $i(s)$ приведена на рис. 4 с поэлементным указанием соответствующих значений уклонов в табл. 1.

Для определения закона распределения полученной выборки уклонов и построения соответствующей гистограммы плотности распределения вначале необходимо проанализировать статистический ряд. Разбиение имеющихся данных в табл. 1 на интервалы производится согласно правилу Старджесса:

$$K = 3,3 \lg N + 1 \approx 14.$$

После определения количества интервалов K выполняется определение количества попаданий значений выборки в каждый из них, а также рассчитываются вероятность каждого из попаданий и плотность этой вероятности. Результаты статистических расчетов приведены в табл. 2.

На рис. 5 приведена гистограмма плотности распределения уклонов пути, вид которой соответствует нормальному закону распределения. В ходе анализа выборки определены ее статистические параметры: значение математического ожидания $m_s = 1,01$, значение среднеквадратического отклонения $\sigma = 4,08$.

Для подтверждения соответствия распределения выборки нормальному закону использован один из критериев согласия статистических распределений, а именно критерий мощности nw^2 [16]. При выполнении проверки гипотезы о соответствии сравнивается эмпирическое значение nw^2 , рассчитываемое на основе анализируемой выборки, и критическое $nw_{кр}^2$. Выражение для расчета nw^2 :

$$nw^2 = \frac{1}{12n} + \sum_{j=1}^n \left[F(x_j) - \frac{j-0,5}{n} \right]^2,$$

где n – размер выборки; x_j – элемент выборки; $(j-0,5)/n$ – вероятность появления j -го элемента выборки; $F(x_j)$ – теоретическая функция нормального распределения в точке x_j .

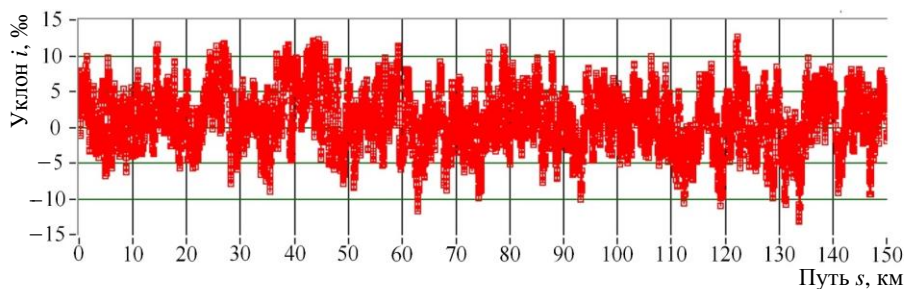


Рис. 4. Результат моделирования возмущения в виде случайной зависимости величины уклона от пути $i(s)$ на интервале 0–150 км

Таблица 1

Параметры участка пути, полученного в результате моделирования

№	$i, ‰$	№	$i, ‰$	№	$i, ‰$	№	$i, ‰$
1	7,487592	26	1,565188	7451	4,316905	7476	3,216856
2	6,949306	27	1,679187	7452	4,154051	7477	2,829136
3	7,600364	28	2,446863	7453	4,275916	7478	3,708547
4	7,897537	29	3,29247	7454	4,348109	7479	5,505077
5	7,857889	30	3,996264	7455	4,473032	7480	5,604226
6	7,815582	31	5,028426	7456	3,445565	7481	5,503303
7	6,827808	32	5,275024	7457	3,658243	7482	5,443822
8	5,220123	33	3,755868	7458	5,084005	7483	4,418048
9	4,750345	34	3,842455	7459	5,357781	7484	4,678445
10	5,116729	35	4,990214	7460	4,717348	7485	6,378836
11	4,576622	36	5,887273	7461	5,59602	7486	6,026792
12	2,775477	37	6,011262	7462	6,788612	7487	4,303474
13	0,396255	38	4,766671	7463	6,666444	7488	2,695131
14	-1,17717	39	4,793798	7464	6,53147	7489	1,79849
15	-0,78183	40	5,599779	7465	6,032821	7490	1,740969
16	1,201234	41	4,547252	7466	6,189157	7491	1,39118
17	3,274806	42	3,912047	7467	5,937854	7492	1,3871
18	4,899281	43	4,470109	7468	5,677159	7493	1,375359
19	6,425899	44	5,145826	7469	5,778786	7494	0,811107
20	6,608877	45	5,243077	7470	3,945527	7495	-0,7788
21	6,405222	46	3,735187	7471	3,072976	7496	-1,98323
22	5,460729	47	2,981449	7472	4,263409	7497	-1,419
23	4,08356	48	3,058443	7473	4,971415	7498	-0,93712
24	4,233204	49	3,248745	7474	4,151005	7499	3,216856
25	3,153631	7475	3,982782	7500	2,829136

Таблица 2

Статистический ряд выборки реализации $i(s)$

j	Разряд, ‰	Число попаданий n_j	Вероятность попадания P_j	Плотность вероятности f_j
1	-13,18; -11,34	8	0,0016	0,000867
2	-11,34; -9,49	22	0,00293	0,001588
3	-9,49; -7,65	103	0,0137	0,007429
4	-7,65; -5,80	209	0,0278	0,01507
5	-5,80; -3,96	489	0,0652	0,03535
6	-3,96; -2,12	896	0,11946	0,06478
7	-2,12; -0,27	1117	0,14893	0,08076
8	-0,27; 1,57	1281	0,1708	0,092624
9	1,57; 3,41	1249	0,16653	0,090391
10	3,41; 5,26	948	0,1264	0,06854
11	5,26; 7,11	659	0,0878	0,04761
12	7,11; 8,95	336	0,0448	0,024295
13	8,95; 10,80	146	0,01946	0,01055
14	10,80; 12,64	37	0,00493	0,00267

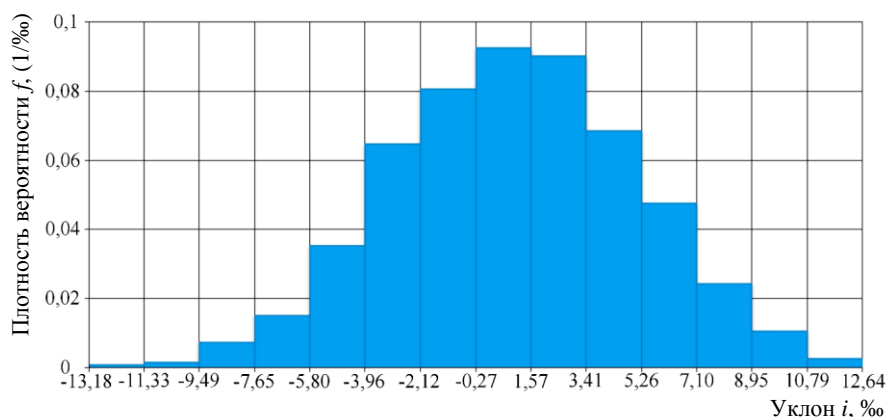


Рис. 5. Гистограмма плотности распределения величин уклонов моделируемого пути

Согласно критерию гипотеза о нормальном законе распределения не противоречит имеющимся данным в случае выполнения условия $nw^2 < nw_{кр}^2$. В настоящей работе принят уровень значимости $\alpha = 0,1$, при котором $nw_{кр}^2 = 0,347$. По результатам проведенных расчетов эмпирическое значение составляет $nw^2 = 0,242$, вследствие чего гипотеза о нормальном законе распределения уклонов пути полученной выборки не отвергается.

Модель САУ разработана в программной среде Embarcadero C++ Builder. Для выполнения эксперимента по проверке эффективности работы САУ при наличии случайного возмущения были заданы следующие условия проведения имитационного моделирования. В качестве ОУ выбран равномерно загруженный 5-вагонный электропоезд ЭС1 общей массой 320 т. Моделируемые режимы движения: разгон до скорости $v_3 = 60$ км/ч при движении на площадке с последующей стабилизацией скорости на достигнутом значении при движении по подъему; разгон до скорости $v_3 = 120$ км/ч со стабилизацией при движении по переменному профилю пути.

Общее время моделирования составляет $t = 320$ с. По результатам расчета случайного профиля пути (табл. 1) для проведения эксперимента было отобрано 392 элемента, характеризующихся величиной $i > 0$, для реализации поддержания скорости электропоезда без перехода в режим торможения. Таким образом, моделируемый участок профиля пути включает в себя площадку протяженностью 550 м и сочетание элементов, образующих переменный профиль пути, протяженностью 7840 м.

В соответствии с заданными ранее условиями проведения эксперимента, на рис. 6–8 приведены результаты моделирования работы САУ скоростью при наличии случайного возмущения, а именно следующие зависимости от времени: изменения величины уклона под первым вагоном электропоезда $i(t)$ (рис. 6); заданной скорости с задатчика интенсивности $v_{зи}(t)$, измеренной скорости $v_{изм}(t)$, фактической скорости движения $v_{ф}(t)$ (рис. 7); реализуемой тяговым электроприводом силы тяги $F_k(t)$ (рис. 8).

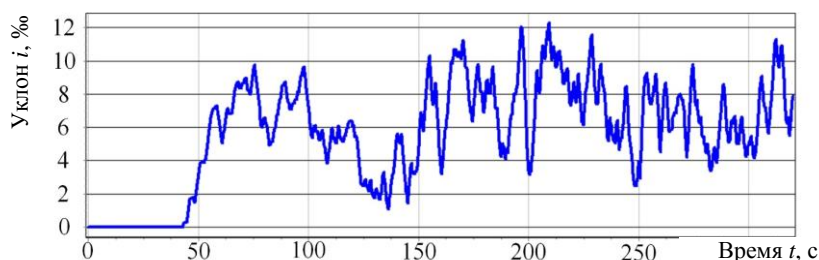


Рис. 6. Зависимость изменения величины уклона под первым вагоном электропоезда от времени

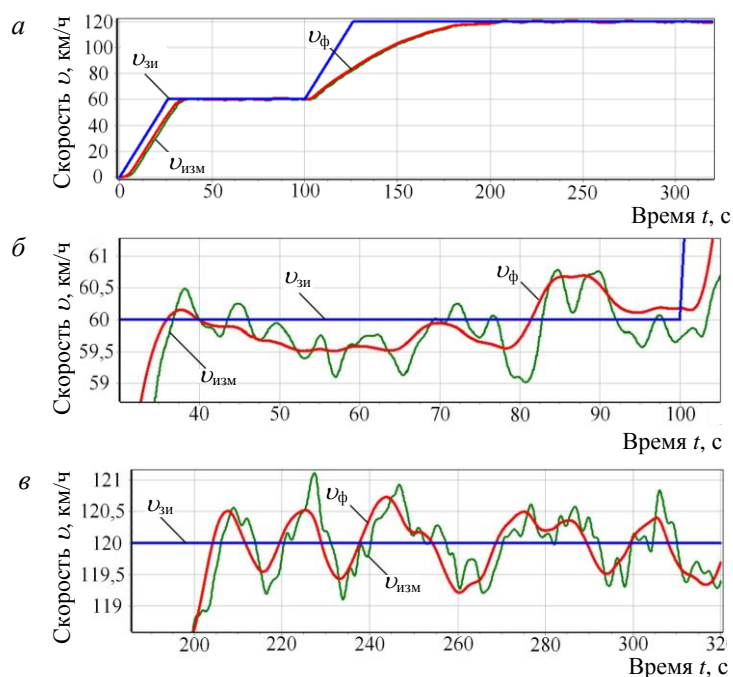


Рис. 7. Зависимости $v_{зи}(t)$, $v_{изм}(t)$ и $v_{ф}(t)$: а – на интервале 0–320 с; б – на интервале 40–100 с; в – на интервале 200–320 с

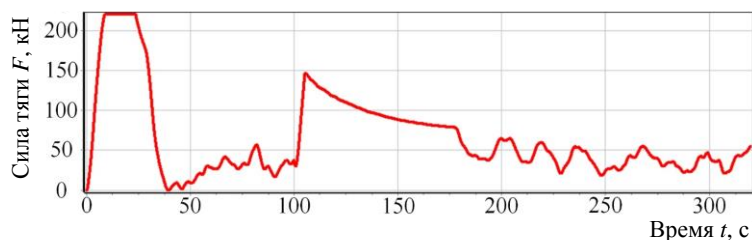


Рис. 8. Зависимость $F_k(t)$ электропоезда

Как видно из полученных результатов, оценку эффективности работы САУ следует разбить на несколько этапов в соответствии с реализованными режимами движения электропоезда.

На первом этапе длительностью $t = 100$ с осуществлен разгон электропоезда до $v_3 = 60$ км/ч при движении на площадке с дальнейшей стабилизацией скорости при движении по переменному профилю пути (рис. 6). Согласно принятой совокупности показателей качества первый этап разгона и стабилизации (рис. 7, б) характеризуется переходной функцией аperiодического вида, величиной перерегулирования $\sigma = 0,15$ км/ч, временем протекания переходного процесса $t_{пер} = 33,11$ с, величиной квадратичной интегральной ошибки в установившемся режиме $I_{уст} = 0,370$. Как видно на рис. 6 и рис. 7, б, при движении электропоезда в интервале времени 40–70 с по подъёму, значение уклона которого изменяется от $i = 0$ до $i = 8,65$ ‰, наибольшее отклонение скорости составило 0,5 км/ч, что является допустимым при установленных требованиях к точности регулирования. Также на рис. 8 видно, что при разгоне электропоезда значение реализуемой силы тяги соответствует значению накладываемых на тяговую характеристику ограничений ($F_k = F_{max} = 220$ кН), при этом при переходе в режим стабилизации скорости при движении по переменному профилю пути значение силы тяги поддерживается в диапазоне от 0 до 55 кН для минимизации влияния сопротивления движению.

Второй этап длительностью $t = 220$ с включает в себя разгон электропоезда до $v_3 = 120$ км/ч и режим стабилизации на данном значении при движении по переменному профилю пути. Аналогично первому этапу проведем анализ качества регулирования скорости: переходная функция аperiодическая, при этом колебания скорости движения v_ϕ величиной $\pm 0,5$ км/ч обоснованы колебательным характером изменения величины отфильтрованной измеренной скорости $v_{изм}$ и движением электропоезда по переменному профилю пути; величина перерегулирования составила $\sigma = 0,5$ км/ч; время про-

текания переходного процесса $t_{пер} = 101,28$ с; величина квадратичной интегральной ошибки в установившемся режиме $I_{уст} = 0,410$. Разгон до $v_3 = 120$ км/ч осуществляется в соответствии с накладываемыми на тяговую характеристику ограничениями ($F_k = F_{max} = 146$ кН), при этом режим поддержания скорости при случайном возмущении в виде профиля пути реализуется при значении силы тяги F_k , соответствующем 40 ± 20 кН.

Выводы

1. Отличительной особенностью разработанной САУ является адаптация пропорционально-интегрального с прогнозом рассогласования закона управления к изменению режима движения электропоезда.

2. Модель САУ учитывает методическую погрешность измерительного тракта. Для уменьшения влияния погрешности измерения на качество регулирования скорости в структуру САУ включен фильтр низких частот Баттерворта 5-го порядка, улучшающий протекание переходного процесса в тяговом приводе.

3. Использование генератора белого шума и формирующего фильтра Баттерворта 1-го порядка позволяет моделировать множество реализаций случайной функции с заданными автокорреляционной функцией и спектральной плотностью и определяющих зависимость уклона от пути. Распределение полученной выборки значений уклонов от пути соответствует нормальному закону распределения.

4. Разработанная методика анализа функционирования САУ позволяет определить показатели качества управления и их соответствие нормативным требованиям на множестве случайных возмущений.

5. В ходе анализа результатов имитационного моделирования установлено, что разработанная структура САУ скоростью обеспечивает удовлетворительное качество управления (высокую точность регулирования) при движении электропоезда как на площадке, так и по переменному профилю пути во всем допустимом диапазоне скоростей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Охотников А.Л., Волкова И.А. Проекты развития систем автоматического управления движением поездов // Наука и технологии железных дорог. 2023. № 1. С. 25–31.
2. Пудовиков О.Е., Аунг З.Т. Система автоматического управления скоростью движения электропоезда городской транспортной системы // Электротехника. 2016. № 9. С. 68–72.
3. Жухин Н.О., Пудовиков О.Е. Совершенствование алгоритмов управления скоростью движения длинносоставных грузовых поездов // Электротехника. 2021. № 9. С. 41–46.
4. Баранов Л.А., Легкая В.И., Пудовиков О.Е. Система автоматического управления скоростью пригородного электропоезда // Электротехника. 2024. № 9. С. 81–88.
5. Расчеты и испытания тяжеловесных поездов / Е.П. Блохин, Л.А. Манашкин, Е.Л. Стамблер [и др.]. Москва : Транспорт, 1986. 263 с.
6. Легкая В.И., Пудовиков О.Е. Совершенствование структуры системы автоматического управления скоростью электропоезда // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2025. № 1. С. 190–200.
7. Баранов Л.А. Модели и методы синтеза микропроцессорных систем управления скоростью электроподвижного состава с непрерывным управлением тягой // Вестник МИИТа. Вып. 10. Москва : МИИТ, 2004. С. 3–16.
8. Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава / Л.А. Баранов, Я.М. Головичер, Е.В. Ерофеев, В.М. Максимов. Москва : Транспорт, 1990. 272 с.
9. Легкая В.И. Применение фильтра низких частот для снижения влияния методической погрешности измерительного тракта в структуре системы автоматического управления скоростью // Бюллетень результатов научных исследований. 2025. № 1. С. 72–87.
10. Kotz S., Dorp J.R.V. Beyond Beta: Other Continuous Families of Distributions with Bounded Support and Applications // World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2004.
11. Легкая В.И., Пудовиков О.Е. Влияние модели тракта измерения скорости на структуру системы автоматического управления скоростью электропоезда // Интеллектуальные транспортные системы : материалы III международной научно-практической конференции / Российский ун-т транспорта. Москва, 2024. С. 230–238.
12. Баранов Л.А., Савоськин А.Н., Пудовиков О.Е. Автоматизированные системы управления электроподвижным составом: учебник. В 3 ч. Ч. 1. Теория автоматического управления. Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2013. 400 с.
13. Легкая В.И., Пудовиков О.Е. Разработка методики выполнения имитационного эксперимента для исследования регулятора скорости // Интеллектуальные транспортные системы : материалы IV международной научно-практической конференции. Москва : Российский ун-т транспорта, 2025. С. 254–261.
14. Баранов Л.А., Пудовиков О.Е., Легкая В.И. Методика анализа функционирования регулятора скорости электроподвижного состава при случайном возмущении // Электротехника. 2025. № 9. С. 14–19.
15. Головичер Я.М. Разработка и исследование алгоритмов программных систем автоведения поездов : дисс. ... канд. техн. наук. Москва : МИИТ, 1977.
16. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. Москва : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. 416 с.

REFERENCES

1. Okhotnikov A.L., Volkova I.A. Proyeekty razvitiya sistem avtomaticheskogo upravleniya dvizheniyem poyezdov [Projects for the development of automatic train control systems] // Nauka i tekhnologii zheleznykh dorog. 2023. № 1. S. 25–31.
2. Pudovikov O.E., Aung Z.T. Sistema avtomaticheskogo upravleniya skorost'yu dvizheniya elektropoyezda gorodskoy transportnoy sistemy [Automatic speed control system for electric trains in the urban transport system] // Elektrotekhnika. 2016. № 9. P. 68–72.
3. Zhukhin N.O., Pudovikov O.E. Sovershenstvovaniye algoritmov upravleniya skorost'yu dvizheniya dlinnosostavnykh gruzovykh poyezdov [Improving speed control algorithms for long freight trains] // Elektrotekhnika. 2021. № 9. S. 41–46.
4. Baranov L.A., Legkaya V.I., Pudovikov O.E. Sistema avtomaticheskogo upravleniya skorost'yu prigorodnogo elektropoyezda [Automatic speed control system for suburban electric trains] // Elektrotekhnika. 2024. № 9. S. 81–88.
5. Raschety i ispytaniya tyazhelovesnykh poyezdov [Calculations and testing of heavy trains] / E.P. Blokhin, L.A. Manashkin, E.L. Stambler [i dr.]. Moskva : Transport, 1986. 263 s.
6. Legkaya V.I., Pudovikov O.E. Sovershenstvovaniye struktury sistemy avtomaticheskogo upravleniya skorost'yu elektropoyezda [Improving the structure of the automatic speed control system for electric trains] // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. 2025. № 1. S. 190–200.
7. Baranov L.A. Modeli i metody sinteza mikroprotsessornykh sistem upravleniya skorost'yu elektropodvizhnogo sostava s nepreryvnyim upravleniyem tyagoy [Models and methods for synthesizing microprocessor-based speed control systems for electric rolling stock with continuous traction control] // Vestnik MIITa. Vyp. 10. Moskva : MIIT, 2004. S. 3–16.
8. Mikroprotsessornyye sistemy avtovedeniya elektropodvizhnogo sostava [Microprocessor-based systems for automatic control of electric rolling stock] / L.A. Baranov, Y.M. Golovicher, E.V. Yerofeyev, V.M. Maksimov. Moskva : Transport, 1990. 272 s.
9. Legkaya V.I. Primeneniye fil'tra nizkikh chastot dlya snizheniya vliyaniya metodicheskoy pogreshnosti izmeritel'nogo trakta v strukture sistemy avtomaticheskogo upravleniya skorost'yu [Application of a low-pass filter to reduce the influence of methodical error of the measuring path in the structure of an automatic speed control system] // Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy. 2025. № 1. S. 72–87.

10. Kotz S., Dorp J.R.V. Beyond Beta: Other Continuous Families of Distributions with Bounded Support and Applications // World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2004.

11. Legkaya V.I., Pudovikov O.E. Vliyaniye modeli trakta izmereniya skorosti na strukturu sistemy avtomaticheskogo upravleniya skorost'yu elektropoyezda [The influence of the speed measurement path model on the structure of the automatic speed control system of an electric train] // Intellektual'nye transportnye sistemy: materialy III mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii / Rossiyskiy un-t transporta. Moskva, 2024. S. 230–238.

12. Baranov L.A., Savoskin A.N., Pudovikov O.E. Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya elektropodvizhnym sostavom: uchebnik: v 3 ch. CH. 1: Teoriya avtomaticheskogo upravleniya [Automated control systems for electric rolling stock: textbook: in 3 parts. Part 1: Theory of automatic control]. Moskva : Uchebno-metodicheskii tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte, 2013. 400 s.

13. Legkaya V.I., Pudovikov O.E. Razrabotka metodiki vypolneniya imitatsionnogo eksperimenta dlya issledovaniya regul'yatora skorosti [Development of a methodology for performing a simulation experiment to study a speed controller] // Intellektual'nye transportnye sistemy: materialy IV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Moskva : Rossiyskiy un-t transporta., 2025. S. 254–261.

14. Baranov L.A., Pudovikov O.E., Legkaya V.I. Metodika analiza funktsionirovaniya regul'yatora skorosti elektropodvizhnogo sostava pri sluchaynom vozmushchenii [Methodology for analyzing the operation of the speed controller of electric rolling stock under random disturbance] // Elektrotehnika. 2025. № 9. С. 14–19.

15. Golovicher Y.M. Razrabotka i issledovaniye algoritmov programmykh sistem avtovedeniya poyezdov [Development and research of algorithms for software systems for automatic train control] : diss. kand. tekhn. nauk. Moskva : MIIT, 1977.

16. Bol'shev L.N., Smirnov N.V. Tablitsy matematicheskoy statistiki [Tables of mathematical statistics]. Moskva : Nauka; Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1983. 416 s.

Информация об авторе

В.И. Легкая – аспирант кафедры «Электропоезда и локомотивы».

Information about the author

V.I. Legkaya – Post-graduate Student, Department of Electric Trains and Locomotives.

Статья поступила в редакцию 21.10.2025; одобрена после рецензирования 24.11.2025; принята к публикации 24.11.2025.
The article was submitted: 21.10.2025; approved after reviewing: 24.11.2025; accepted for publication: 24.11.2025.

Научная статья
УДК 656.21:004.94
doi:10.31079/2415-8658-2025-4-68-73

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ПЕРСОНАЛА ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПОЕЗДОВ

Меркулов Андрей Валентинович¹, Годяев Александр Иванович²

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

¹ mascot48@rambler.ru

² Zav_AT@festu.khv.ru

Аннотация. Проанализированы и подобраны применительно к каждой решаемой задаче компьютерные технологии, обеспечивающие создание современного многофункционального лабораторного комплекса подготовки дежурных по станции и поездных диспетчеров. Обозначены подходы и средства для реализации более совершенной имитационной модели инфраструктуры железнодорожного участка. Показано, что использование современных компьютерных технологий позволяет легко адаптировать комплекс к любому участку железной дороги с реальными инфраструктурными объектами и системами управления движением поездов, а включённые в комплекс имитационные модели обеспечивают воспроизведение различных поездных ситуаций, складывающихся при управлении движением. Для подготовки исходных данных при моделировании железнодорожного участка предложены технологии автоматизации OLE (object linking and embedding), позволяющие считывать графические данные с чертежа проекта (nanoCAD или MS Visio) и формировать базу данных имитационной модели.

Ключевые слова: имитационная модель, дежурный по станции, поездной диспетчер, железнодорожный тренажер, математическая модель, технология автоматизации, алгоритм, программа, микропроцессор

Original article

USE OF MODERN COMPUTER TECHNOLOGIES IN TRAINING OPERATIONAL PERSONNEL FOR TRAIN TRAFFIC MANAGEMENT

Merkulov Andrey V., Godyaev Alexander I.

^{1, 2} Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia

¹ mascot48@rambler.ru

² Zav_AT@festu.khv.ru

Abstract. The paper analyzes and selects computer technologies tailored to each specific task for the development of a modern multi-functional laboratory complex designed for training station duty officers and train dispatchers. It outlines approaches and tools for implementing an improved simulation model of railway section infrastructure. The study demonstrates that using contemporary computer technologies enables easy adaptation of the complex to any railway section with real infrastructure facilities and train traffic control systems, while the integrated simulation models reproduce various train operation scenarios encountered during traffic management. To prepare the initial data of the railway section model, OLE automation technologies (object linking and embedding) are proposed, which allow reading graphic data from the project drawing (nanoCAD or MS Visio) and creating a database of the simulation model.

Keywords: simulation model, the duty of the railway station, train dispatcher, railway simulator, mathematical model, automation technology, algorithm, program, microprocessor

Практическая реализация, а впоследствии – совершенствование алгоритмов и программ, последовательное вовлечение новых компьютерных технологий в разработку математической модели железнодорожного участка и его инфраструктуры, позволили провести анализ существующих подходов, наиболее часто применяемых при создании программного обеспечения для сложного многоуровневого и многозадачного процесса, которым является организация перевозок и управление системами обеспечения движения поездов [1, 2]. Вместе с развитием информационных технологий, компьютерных систем и сетей в процесс создания и модернизации

учебного тренажерного комплекса были внедрены новые технологии и методы, изменившие и способ построения, и алгоритм работы математических моделей. Среди них: средства автоматизированного проектирования с применением геодезических и аэрокосмических данных, топографических карт местности; программные средства генерации ландшафтов; системы управления базами данных (СУБД); средства автоматизации, связывания и внедрения объектов (OLE); рекурсивные методы генерации исходных данных и поиска решений.

Внешний вид нового разработанного тренажера дежурного по станции представлен на рис. 1.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ПЕРСОНАЛА ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПОЕЗДОВ

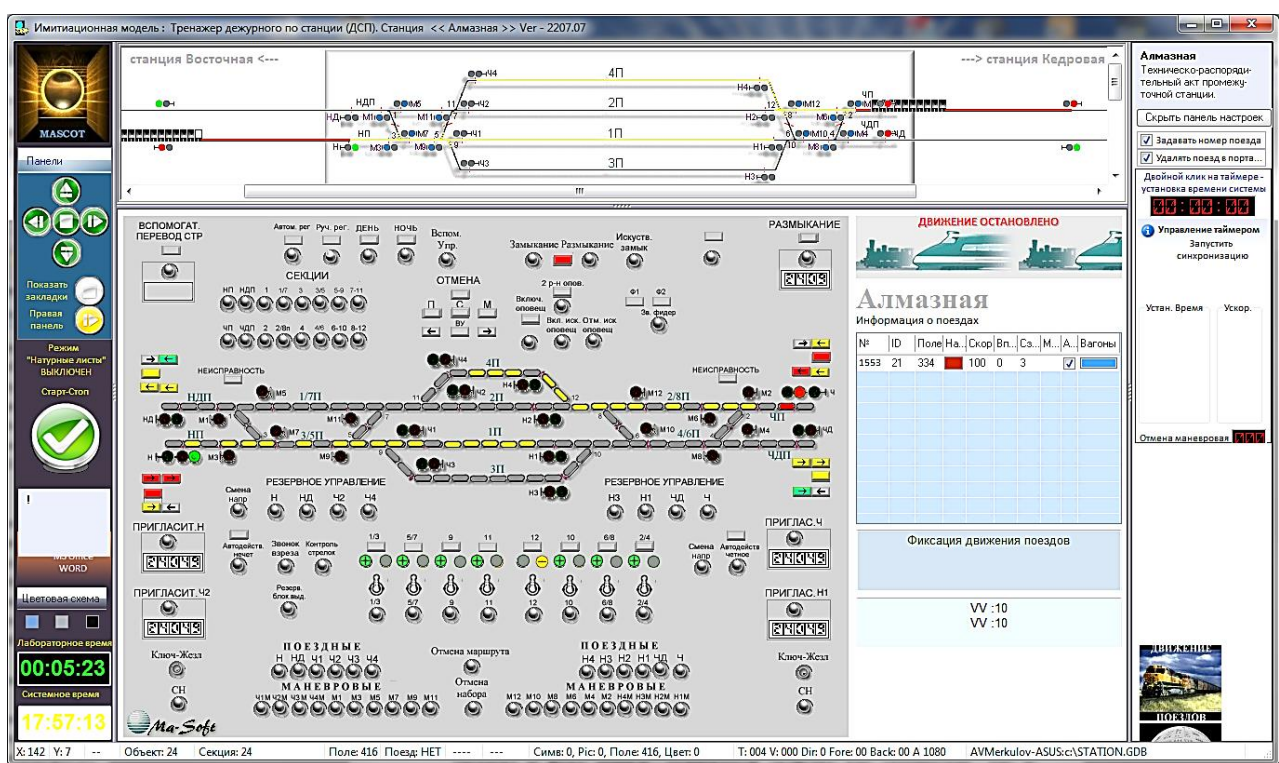


Рис. 1. Тренажер дежурного по станции (ДСП)

Тренажер состоит из пяти основных отображаемых пользователю виртуальных панелей:

- 1) верхней – математической модели участка, станции и используемых для управления движением систем СЦБ. С помощью данной модели производится задание и имитация всех поездных передвижений на моделируемом участке железной дороги;
- 2) центральной – пульт-табло, рабочего места дежурного по станции (ДСП), представляющего собой аппарат управления и контроля за всеми поездными и маневровыми передвижениями на станции и функционированием систем железнодорожной автоматики;
- 3) центральной правой – информационной панели о прибытии и отправлении поездов, используемой при формировании графика исполненного движения (ГИД);
- 4) левой – панели управления временем, движением, отображением, документацией;
- 5) правой – дополнительной информационной панели.

Хотя многие компьютерные технологии, используемые в тренажере, являются известными и широко реализуются при создании различных программных комплексов, эффективность их использования и качество получаемого программного продукта во многом определяется присущими каждой решаемой задаче индивидуальными особенностями. Научная новизна разработанного комплекса заключается в проведении анализа, рационального выбора, а в ряде случаев – и некоторой модификации соответствующих компь-

ютерных технологий применительно к каждой решаемой задаче. Это позволило не только существенно упростить и частично автоматизировать методику создания соответствующих тренажерных комплексов, но также легко адаптировать каждый разрабатываемый комплекс под любой железнодорожный участок с реальной инфраструктурой. Данный подход также имеет практическое значение, позволяя проводить обучение в максимально приближенных условиях к участку, обслуживаемому соответствующим оперативным управленческим персоналом, к имеющимся на данном участке техническим средствам и системам обеспечения движения поездов. Также следует отметить, что в тренажере ДСП используется модель, в которой присутствуют все функции реального рабочего места дежурного по станции, и имеется возможность полностью воссоздать условия работы этих специалистов.

Основная концепция проектирования элементов инфраструктуры базируется на создании многослойной связанной структуры данных, формируемой на основе визуальных слоев [3]. Каждый слой, а следовательно, и связанные с ним данные несет информацию об определенных характеристиках железнодорожного участка, расположенных на нём объектах ландшафта и конкретном типе объектов технической инфраструктуры. Реализация данного метода показала его удобство и простоту как на этапе конструирования виртуального участка, так и на этапе автоматизированного формирования информационной системы и базы данных, содержа-

щей свойства статических и динамических объектов. Несмотря на то, что такой подход накладывает жесткие требования по управлению распределенной информационной системой (трафики, транзакции, взаимная блокировка, события и уведомления в базе данных), он является очень эффективным. Используемая СУБД обеспечивает ссылочную и смысловую целостность данных, что позволяет не беспокоиться о текущем состоянии и сохранности модели даже при частичном отключении входящих в неё компьютеров [4, 5]. Работа над созданием сложной имитационной модели с динамическими данными, циркулирующими в сети и базе данных, показала, что оптимизация запросов и транзакций представляет собой задачу, которую необходимо решать ещё на этапе проектирования системы и формирования структур данных. Это необходимо не только для корректного функционирования своих задач, но и для разгрузки сетевого трафика с целью предоставления полноценных ресурсов другим пользователям сети. Механизм, реализованный в тренажере, приведен на рис. 2.

Предложенная концепция основана на следующем утверждении: для создания сложной имитационной модели необходима её декомпозиция и разработка алгоритмов на определенном уровне детализации, а функциональные задачи следует решать уже на взаимодействии разных уровней иерархии сложной системы. Необходим подход, облегчающий разработку и объединение разных компонентов большого программного проекта и использую-

щий возможности современных средств разработки и автоматизации. Проектирование элементов инфраструктуры основано на применении слоев, на которых размещаются объекты со своими функциями и свойствами. Количество слоев определяется степенью интеграции системы, но каждый из них связан координатами объектов и содержит собственную структуру данных.

К примеру, имитационная модель работы станции – это сложный алгоритм, реализующий зависимости в электрических схемах, а программа – это последовательность инструкций, и при сопоставлении возникает нарушение соответствия между цепочкой логических операций и одновременной работой физических устройств при подаче питания в схему. Для облегчения процесса алгоритмизации предложен принцип, который позволяет избавиться от множественных ветвлений в исходном коде программы, от нахождения этих точек ветвления, вызова процедур, а также подготовки параметров для новых процедур и функций.

Информация, курсирующая в имитационных моделях станций и участков, поступает в базу данных, где происходят внутренние процессы, связанные с изменением (UPDATE), добавлением (INSERT) или удалением (DELETE) данных до (BEFORE) или после (AFTER) соответствующего события. Механизм событий активирует триггеры, являющиеся сигнализаторами запуска процессов, для которых эти данные актуальны.

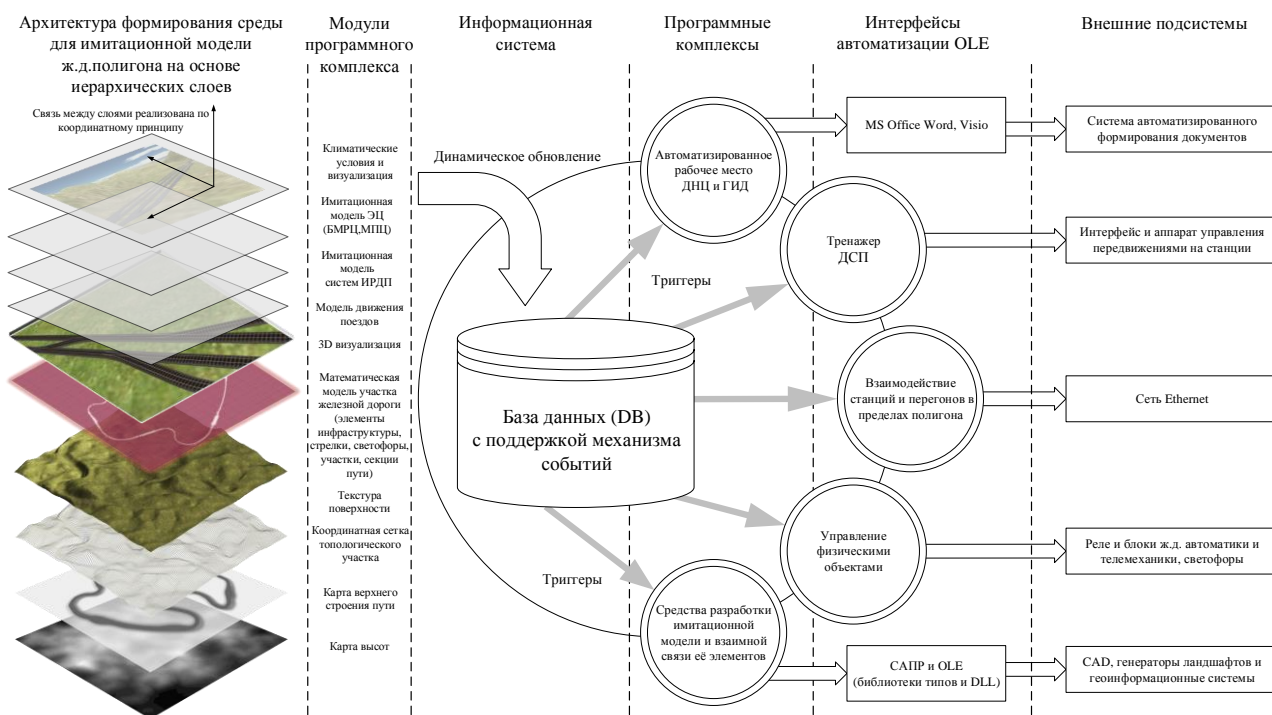


Рис. 2. Технология формирования и развития имитационной модели на основе событий базы данных

Программа, использующая триггеры, может быть совершенно автономной и даже создана на другом языке программирования и под другую платформу.

Разработка отдельных программ меньшей сложности значительно облегчает настройку и отладку, поскольку каждая из них взаимодействует только с базой данных под управлением её событий. Разработчику нет необходимости создавать гигантские циклы обслуживания сложного имитационного процесса. Контейнером, связывающим различные функциональные блоки, является информация, размещённая в базе данных. Такая технология позволяет наращивать систему, избегать перегруженного программного кода, путаницы в последовательности использования внутренних динамических параметров системы. Так, например, движение поезда обрабатывает модель расчёта тяговых характеристик подвижного состава на заданном участке с соответствующим ландшафтом, а фиксация положения колёсных пар отражается в модели подсистемы интервального регулирования через данные, соответствующие путевым устройствам. События изменения состояния каждого участка пути инициируют срабатывание схемы фиксации прохождения поезда в пределах определённой рельсовой цепи, станции или перегона.

В ходе разработки и многочисленной модернизации алгоритмов и программ был сделан вывод о том, что все функции, реализующие физические и технологические процессы (инициализация имитационной модели, сетевое взаимодействие СУБД, моделирование и расчет движения всех подвижных единиц, работа систем СЦБ, действия оперативного персонала и пр.) должны быть само-адаптированы к структуре данных, полученной в процессе подготовки модели. Проще говоря, весь участок как бы собирается из определённых «пазлов», которые связываются между собой взаимным топологическим размещением, и в конечном итоге создают путевое развитие участка и станций, формируют заданную систему управления движением поездов.

Здесь можно провести некоторую аналогию с используемыми в строительстве Building Information Model (BIM) моделями, с каждым элементом которых связаны данные различных топологических, геометрических, функциональных, физических стоимостных и других характеристик моделируемого объекта [8]. Как уже указывалось выше, в рассматриваемой модели железнодорожного участка также применяется принцип объектного проектирования, когда сложная модель собирается из элементов (пазлов), каждый из которых относится к определённому типу элемента, с которым связаны его свойства, информационные данные и алгоритм функционирования. Количество таких

элементов ограничивается только возможностями виртуальной компьютерной модели.

Отличительной особенностью в описываемой модели является то, что она может использоваться как в процессе обучения и профессиональной подготовки оперативно управленческих работников железнодорожного транспорта, так и при оценке эффективности различных технических, технологических и управленческих решений, используемых на участке. Модель может создаваться как на этапе проектирования, так и для реально существующего железнодорожного участка и находящейся в эксплуатации на данном участке железнодорожной инфраструктуры. Однако в каждом конкретном случае проектирования модели важно чётко понимать цель её создания, определяющую требуемый уровень детализации каждого элемента.

Системы автоматизированного проектирования (САПР) позволяют сравнительно быстро разрабатывать модули проекта на основе простых примитивов: линий, дуг, сплайнов. В каждом проекте отсутствует необходимость вновь создавать элементы, разработанные ранее, есть возможность создавать и использовать большое количество библиотек и компонентов с требуемыми свойствами. Чтобы приложениям можно было напрямую взаимодействовать друг с другом, используется технология автоматизации OLE (связывание и внедрение объектов) – это механизм, который позволяет помещать документ из одного приложения (сервера) в документ из другого (клиента). С помощью OLE команды можно выдавать в одном приложении и отправлять в другое (со временем «OLE» было изменено на «ActiveX», затем стало именоваться «ActiveX Automation», а в конечном итоге – просто «Automation»). Технология, объединяющая все это, называется COM (компонентная объектная модель) и определяет способы совместной работы приложений [9]. Приложение, которым манипулируют, – это сервер Автоматизации. Отвечающее приложение, – это клиент, который обращается к экземпляру сервера, как если бы это был любой другой объект, считывая и устанавливая свойства и вызывая методы. Это означает, что приложение, формирующее имитационную модель, может обращаться к объектам приложений Office (например, элементам чертежа Visio).

Применение средств автоматизации (САПР, OLE и др.) позволяет существенно облегчить и ускорить процесс подготовки и настройки моделей участков железной дороги, которые необходимо изучить или исследовать их эксплуатационные показатели. Одной из типичных задач, решаемых симуляторами в рамках имитационного эксперимента, является определение оптимальных маршрутов поездов и объёмов маневровой работы в пределах станций [10–12]. Кроме того, необходимо обеспе-

чить подготовку оперативного персонала, связанного с управлением процессом перевозок.

На рис. 2 показан весь участок диспетчерского контроля, включенный в АРМ преподавателя, с представленными на тренажёре соответствующими типами систем интервального регулирования. В составе учебного комплекса находится 8 станций, 3 круга диспетчерского управления с рабочими местами диспетчера (ДНЦ), графиками движения поездов и аппаратами диспетчерского (дистанционного) управления станциями.

Моделирование систем управления осуществляется на основе специально разработанных алгоритмов, использующих методы рекурсивного поиска решений, что в совокупности с модульной архитектурой обеспечивает возможность автоматизации процесса подготовки модели, формирования её внутренних связей [7]. Рекурсивные алгоритмы особенно эффективны при реализации широкого пошагового поиска для формирования и принятия решений [4, 5].

В основе построения железнодорожного пути лежит использование параметрических кривых (сплайнов) и методы изогометрической аппроксимации. Этот принцип реализуется в программе моделирования движения поезда. Его применение избавляет от необходимости расчета координат всех точек на кривой и позволяет вычислять только положение опорных точек поезда, когда возникает необходимость в визуализации трехмерной сцены.

Проведённые в процессе построения модели исследования показали, что построение траекторий движения более целесообразно перенести на этап проектирования модели. Данный подход существ-

венно экономит вычислительные ресурсы, затрачиваемые в процессе реализации модели.

Подходящая модель железнодорожной инфраструктуры (связанная с алгоритмами, которые создают все возможные маршруты для перемещения подвижных единиц) может быть подготовлена средствами MS Visio. Использование алгоритмов в инструментах моделирования (работающих на СОМ уровне) расширяет возможности моделирования реалистичных схем станций и участков (особенно для сложных систем управления движением поездов), что способствует моделированию сложного железнодорожного движения и, таким образом, лучшему применению результатов моделирования в обучающих комплексах.

Для качественного улучшения эксплуатационных показателей железнодорожной сети применяются методы имитационного моделирования, которые позволяют проводить исследования функционирования железнодорожного участка при изменении объёма перевозок и технологии работы объектов железнодорожной инфраструктуры. Подобные тренажёры нового поколения с каждым годом всё шире используются как для проведения различных исследований, так и при обучении и переподготовке специалистов в учебных заведениях и на предприятиях железнодорожного транспорта.

Таким образом, в сочетании с научным подходом, с методами поддержки принятия решений, интеллектуальными технологиями и экспертными функциями, применение компьютерного моделирования открывает большие перспективы для практических исследований, научных и учебных целей.

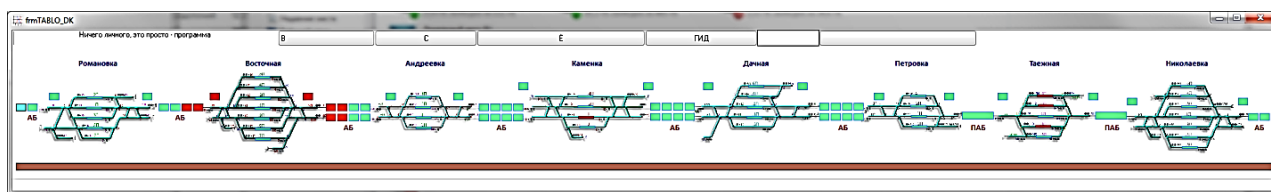


Рис. 2. Участок диспетчерского контроля учебного полигона

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шаманов В.И. Обобщенная математическая модель процесса эксплуатации систем автоматики и телемеханики // Автоматика на транспорте. 2016. Т. 2, № 2. С. 163–179.
2. Меркулов А.В. Имитационное моделирование работы станции: монография. В 2 ч. Ч. 1. Алгоритмизация работы систем автоматики и телемеханики. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2012. 169 с.
3. Меркулов А.В., Годяев А.И. Трехмерная визуализация и автоматизация проектирования виртуальной среды тренажера-симулятора участка железной дороги // Инновации в системах обеспечения движения поездов : материалы 1-й Международной научно-практической конференции, 19–20 мая 2016 г. Самара : СамГУПС, 2016.
4. Меркулов А.В., Годяев А.И. Некоторые аспекты имитационного моделирования работы станции // Вестник тихоокеанского государственного университета. 2015. № 4(39). С. 109–116.
5. Merkulov A.V., Godyaev, A.I. Use of Computer Technologies in the Railway Infrastructure Elements Modeling and Train Traffic Control Systems Simulator Development // EastConf : International Science and Technology Conference. 2019. P. 1–5. URL : <https://doi.org/10.1109/EASTCONF.2019.8725315> (дата обращения: 16.05.2025).
6. Меркулов А.В. Управление транзакциями и синхронизацией данных в информационной среде имитационной модели железнодорожного участка // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке : труды Всероссийской научно-практической конференции. Т. 1. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2017. С. 75–81.

7. Меркулов А.В. Модульный конструктор имитационной модели железнодорожного участка // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке : труды Всероссийской научно-практической конференции (18–21 апреля 2017 г.). Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2017. С. 194–199.
8. Skiena S. The Algorithm Design Manual. Boston, Massachusetts, USA : Springer, 2008. P. 480. doi:10.1007/978-1-84800-070-4-4
9. Тамар Э. Гранор, Делла Мартин. Автоматизация Microsoft Office с помощью Visual Fox Pro. Hentzenwerke Publishing 2000. 446 с.
10. Gosavi A. Simulation-Based Optimization Research / Computer Science Interfaces Series. Boston, Massachusetts, USA : Springer, 2015. doi:10.1007/978-1-4899-7491-4
11. Medeossi G., Fabris de S. Modeling Railway Operations // International. ser. operas. managed sciences. 2018. Vol. 268. P. 1–24. doi:10.1007/978-3-319-72153-8_1
12. Divish R., Kavicka A. Reflexive nested simulations supporting optimization in sequential simulators of railway traffic // AKM Trans. Model. Compute. Simul. 2022. Vol. 32, № 1. Pp. 1–34. doi:10.1145/3467965

REFERENCES

1. Shamanov V.I. Obobshchennaya matematicheskaya model' protsessa ekspluatatsii system avtomatiki i telemekhaniki [Generalized mathematical model of the process of operation of automation and telemechanics systems] // Avtomatika na transporte. 2016. T. 2. № 2. S. 163–179.
2. Merkulov A.V. Imitatsionnoe modelirovanie raboty stantsii [Simulation of station operation]: monografiya. V 2 ch. Ch. 1. Algoritmizatsiya raboty system avtomatiki i telemekhaniki. Khabarovsk: Izd-vo DVGUPS. 2012. 169 s.
3. Merkulov A.V., Godyaev A.I. Tryokhmernaya vizualizatsiya i avtomatizatsiya proektirovaniya virtual'noj sredy trenazhera – simulyatora uchastka zheleznoy dorogi [Three-dimensional visualization and automation of the design of the virtual environment of the simulator – simulator of the railway section] // Innovatsii v sistemakh obespecheniya dvizheniya poezdov : materialy 1-j Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii 19-20 maya 2016 g. Samara : SamGUPS. 2016.
4. Merkulov A.V. Nekotorye aspekty imitatsionnogo modelirovaniya raboty stantsii [Some aspects of simulation modeling of the station's operation] // Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta 2015. № 4(39). S. 109–116.
5. Merkulov A.V., Godyaev, A.I. Use of Computer Technologies in the Railway Infrastructure Elements Modeling and Train Traffic Control Systems Simulator Development // EastConf : International Science and Technology Conference. 2019. Pp. 1–5. URL : <https://doi.org/10.1109/EASTCONF.2019.8725315> (data obrashcheniya: 16.05.2025).
6. Merkulov A.V. Upravlenie tranzaktsiyami i sinkhronizatsiej dannykh v informatsionoj srede imitatsionnoj modeli zheleznodorozhnogo uchastka [Management of transactions and data synchronization in the information environment of the simulation model of the railway section] // Nauchno-tehnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke : trudy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii. T. 1. Khabarovsk : Izd-vo DVGUPS, 2017. S. 75–81.
7. Merkulov A.V. Modul'ny konstruktor imitatsionnoj modeli zheleznodorozhnogo uchastka [Modular designer of a simulation model of a railway section] // Nauchno-tehnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke : trudy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii. (18-21 aprelya 2017 g.). Khabarovsk : Izd-vo DVGUPS. 2017. S. 194–199.
8. Skiena S. The Algorithm Design Manual. Boston, Massachusetts, USA : Springer, 2008. P. 480. doi:10.1007/978-1-84800-070-4-4
9. Tamar E. Granor, Della Martin. Avtomatizatsiya Microsoft Office s pomoshch'yu Visual Fox Pro [Microsoft Office Automation with Visual Fox Pro]. P. 466.
10. Gosavi A. Simulation-Based Optimization Research / Computer Science Interfaces Series. Boston, Massachusetts, USA : Springer, 2015. doi:10.1007/978-1-4899-7491-4
11. Medeossi G., Fabris de S. Modeling Railway Operations // International. ser. operas. managed sciences. 2018. Vol. 268. P. 1–24. doi:10.1007/978-3-319-72153-8_1
12. Divish R., Kavicka A. Reflexive nested simulations supporting optimization in sequential simulators of railway traffic // AKM Trans. Model. Compute. Simul. 2022. Vol. 32, № 1. Pp. 1–34. doi:10.1145/3467965

Информация об авторах

А.В. Меркулов – доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь»;
А.И. Годяев – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика, телемеханика и связь».

Information about the authors

A.V. Merkulov – Associate Professor, Department of Automatics, Telemechanics and Communication;
A.I. Godyaev – Doctor of Science (Engineering), Professor, Department of Automatics, Telemechanics and Communication.

Статья поступила в редакцию 10.06.2025; одобрена после рецензирования 01.11.2025; принята к публикации 01.11.2025.
The article was submitted: 10.06.2025; approved after reviewing: 01.11.2025; accepted for publication: 01.11.2025.

Научная статья
УДК 625.042.3
doi:10.31079/2415-8658-2025-4-74-79

ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ДЛЯ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ВВОДА РЕЛЬСОВЫХ ПЛЕТЕЙ В РАСЧЕТНУЮ ТЕМПЕРАТУРУ ЗАКРЕПЛЕНИЯ

Нейман Вячеслав Александрович¹, Воронцов Денис Сергеевич²

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

¹ Flinston154@yande.ru

² den.sv78@ya.ru

Аннотация. Безопасность и долговечность бесстыкового железнодорожного пути напрямую зависят от правильного закрепления рельсовых плетей при расчетной температуре. Проведение работ в жаркую погоду, когда температура рельса значительно превышает оптимальную температуру закрепления, приводит к возникновению опасных сжимающих напряжений и риску выброса пути.

Предложен метод принудительного и контролируемого охлаждения рельсовой плети с использованием гибридной системы. Разработана и описана конструкция установки для комбинированного охлаждения, использующая вихревые трубки и водяное распыление. Двумерная нестационарная модель теплопередачи для рельса R65, решаемая методом конечных элементов (МКЭ), описывает процесс охлаждения рельса, нагретого до +65 °С, до целевой температуры закрепления +30 °С...±5 °С (оптимальная температура закрепления плетей для Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры). Показана эффективность метода и достижение приемлемой равномерности температуры по сечению рельса.

Ключевые слова: охлаждение рельса, теплопередача, математическое моделирование, вихревая труба, испарительное охлаждение, метод конечных элементов

Original article

APPLICATION OF COMBINED COOLING FOR FORCED ADJUSTMENT OF RAIL STRINGS TO THE DESIGN FASTENING TEMPERATURE

Neyman Vyacheslav A.¹, Vorontsov Denis S.²

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

¹ Flinston154@yande.ru

² den.sv78@ya.ru

Abstract. The safety and longevity of continuous welded railway tracks directly depend on the correct fastening of rail strings at the design temperature. Performing work in hot weather, when the rail temperature significantly exceeds the optimal fastening temperature, leads to the occurrence of dangerous compressive stresses and the risk of track buckling.

This article proposes a method for forced and controlled cooling of rail strings using a hybrid system. The design of an installation for combined cooling, utilizing vortex tubes and water atomization, has been developed and described. A two-dimensional transient heat transfer model for R65 rail, being solved using the finite element method (FEM), describes the process of cooling a rail, heated to +65 °C, to a target fastening temperature of +30 °C...±5 °C (the optimal fastening temperature for rail strings at the West Siberian Infrastructure Directorate). The effectiveness of the method and the achievement of acceptable temperature uniformity across the rail cross-section are demonstrated.

Keywords: rail cooling, heat transfer, mathematical modeling, vortex tube, evaporative cooling, finite element method

Введение

Надежность конструкции бесстыкового пути, являющегося основой современных железных дорог, определяется величиной продольных температурных сил, возникающих в рельсовых плетях [1]. Для предотвращения летних выбросов пути (потери устойчивости из-за сжимающих сил) и зимних разрывов стыков (из-за растягивающих сил) рельсовые плети должны быть закреплены на шпалах при строго определенной расчетной температуре [2, 3].

Этот процесс, называемый «вводом плети в температуру закрепления», является одной из самых ответственных операций в путевом хозяйстве.

Основная технологическая проблема возникает при проведении работ в летний период. Под воздействием солнечной радиации температура рельса может достигать +50 °С...+70 °С, в то время как оптимальная температура закрепления для большинства регионов России составляет ~+30 °С [2]. Закрепление плети при завышенной температуре

приведет к возникновению огромных сжимающих напряжений при последующем остывании, что является прямой предпосылкой к потере устойчивости [4, 5]. Традиционно эта проблема решается либо переносом времени работ, либо использованием гидравлических натяжных устройств для искусственного создания необходимого растяжения. Существует очевидная потребность в технологии, которая может обеспечить высокую, но при этом точно контролируруемую скорость отвода тепла [10].

В данной работе предлагается принципиально новый подход: активное контролируемое охлаждение рельсовой плети до необходимой температуры непосредственно перед ее закреплением. Для этой цели разработана мобильная установка, основанная на синергетическом эффекте взаимного усиления процесса охлаждения от вихревой трубки и водо-испарительного охлаждения. Вихревая трубка – это простое и надежное устройство без движущихся частей, которое разделяет поток сжатого воздуха на горячий и холодный. Холодный поток может легко достигать температур от -20 до -40 °С, обеспечивая мощный источник конвективного охлаждения [7]. Этот эффект усиливается одновременным нанесением мелкодисперсного распыления воды на горячую поверхность [11–13]. Начальное охлаждение от вихревой трубки повышает эффективность испарения, что приводит к резкому увеличению общего коэффициента теплопередачи [8, 9].

Цель работы: разработка и проверка математической модели для оценки эффективности и управляемости предложенного метода для охлаждения рельса Р65 с типичной летней температуры до стандартной температуры закрепления.

Описание установки

Установка для ввода рельсовых плетей в температуру закрепления (рис. 1) представляет собой камеру для охватывания рельсовой плети, включающую в себя коллектор и форсунки, установленные вдоль камеры, источник подачи воздуха в коллектор, источник подачи охлаждающей жидкости и установленные в камере между форсунками воздухопроводные патрубки, сообщающиеся с коллектором.

Данное устройство состоит из корпуса 1, в резьбовые отверстия которого холодным выходным концом установлены вихревые трубки Ранка–Хилша 2 под углом 40 – 50 ° в поперечной плоскости для обеспечения необходимого направления потока охлаждающего воздуха по поверхности рельса от головки к шейке и от подошвы к шейке. Также на корпусе в верхней и нижней его частях между рядами вихревых трубок расположены водяные форсунки 3 под углом 30 – 45 ° относительно горизонтальной плоскости, обеспечивающие большую площадь контакта с поверхностью рельса и создающие тонкую водяную пленку на его поверхности от головки до подошвы. Установка также включает датчик температуры и влажности 4. Следует отметить, что

охлаждение низа подошвы рельса в данном случае не осуществляется.

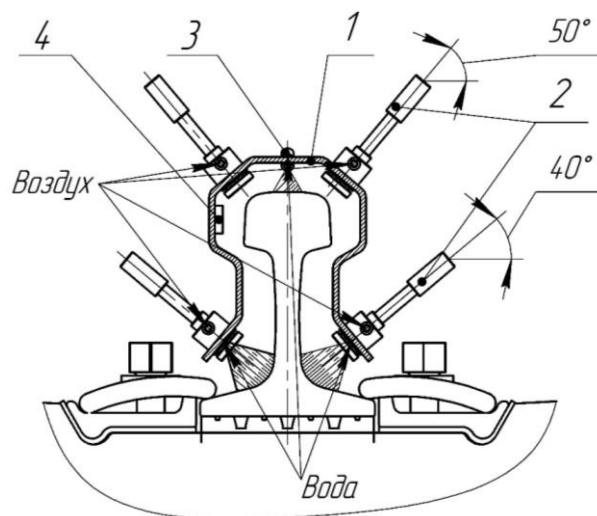


Рис. 1. Установка для ввода рельсовых плетей в температуру закрепления: 1 – корпус; 2 – вихревые трубки Ранка–Хилша; 3 – водяная форсунка; 4 – датчик температуры и влажности

Математическая модель процесса охлаждения

В данном разделе представлена полная математическая формулировка нестационарного процесса теплопереноса в сечении рельса с учетом комбинированных граничных условий.

Геометрия, допущения и свойства материалов

- Расчетная область Ω : двумерная область, точно соответствующая поперечному сечению стандартного железнодорожного рельса типа Р65.

- Начальные условия: принимается, что в начальный момент времени ($t = 0$) рельс имеет равномерную температуру по всему сечению: $T(x, y) = T_0 = 60$ °С.

- Свойства материалов: теплофизические свойства стали (теплопроводность k , удельная теплоемкость c , плотность ρ) считаются зависящими от температуры, что важно для точности моделирования в широком диапазоне температур [6, 10]. Для моделирования используются аппроксимирующие полиномиальные зависимости вида:

$$\begin{aligned} k(T) &= k_0(1 + \alpha_k \Delta T); \\ c(T) &= c_0(1 + \alpha_c \Delta T), \end{aligned}$$

где $k(T)$ – теплопроводность при температуре T ; $c(T)$ – удельная теплоемкость при температуре T ; k_0 – значение параметра при базовой температуре T_0 ; c_0 – значение при температуре T_0 ; α_k – температурный коэффициент для параметра k , определяющий скорость его изменения с температурой; α_c – температурный коэффициент c ; ΔT – разница между текущей и базовой температурами.

Нестационарное распределение температуры $T(x, y, t)$ в расчетной области описывается нели-

нейным уравнением теплопроводности в двумерной декартовой системе координат:

$$\rho(T)c(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k(T)\nabla T),$$

где $\nabla(k(T)\nabla T)$ – дивергенция теплового потока; ∇T – градиент температуры (пространственное изменение температуры).

Данное уравнение описывает изменение тепловой энергии в единице объема за счёт накопления тепла и решается относительно поля температур $T(x, y, t)$ [10].

Ключевым элементом модели является точное описание процессов теплообмена на границах рельса, которые разделены на две зоны: принудительного охлаждения $\Omega_{\text{охл}}$ и естественного охлаждения $\Omega_{\text{ест}}$.

Граничное условие в зоне принудительного охлаждения характеризуется суммарным тепловым потоком $q_{\text{сум}}$, состоящим из трех компонентов (вынужденной конвекции, испарительного охлаждения и теплового излучения):

$$-k(T)\frac{\partial T}{\partial n}\Big|_{\Omega_{\text{охл}}} = q_{\text{вт}} + q_{\text{исп}} + q_{\text{изл}}.$$

Вынужденная конвекция $q_{\text{вт}}$ характеризуется теплоотдачей к холодному потоку воздуха из вихревой трубки

$$q_{\text{вт}} = h_c(T_p - T_{\text{вт}}),$$

где T_p – локальная температура поверхности рельса; $T_{\text{вт}}$ – температура воздуха из вихревой трубки; h_c – коэффициент теплоотдачи для натекающей струи зависит от числа Рейнольдса Re и Прандтля Pr и для модели принимается равным $250 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$.

Испарительное охлаждение $q_{\text{исп}}$ является самым сильным компонентом теплоотвода, который обусловлен фазовым переходом воды в пар

$$q_{\text{исп}} = \dot{m} L_v,$$

где L_v – скрытая теплота парообразования; \dot{m} – массовый поток испарения, определяемый диффузионной моделью

$$\dot{m} = h_m(\rho_{v,s} - \rho_{v,\infty}),$$

где h_m – коэффициент массоотдачи, связанный с коэффициентом теплоотдачи через аналогию Льюиса ($h_c/(c_p\rho)$). Плотность водяного пара у поверхности $\rho_{v,s}$ соответствует состоянию насыщения при температуре поверхности T_s и рассчитывается через уравнение состояния идеального газа

$$\rho_{v,s} = \frac{P(T_s)}{R_v T_s},$$

где $P(T_s)$ – давление насыщения, вычисляется по аппроксимации Антуана

$$\log P(T_s) = A - \frac{B}{C + T_s},$$

где A, B, C – константы, характерные для каждого конкретного вещества и получаемые экспериментальным путём.

Коэффициент массоотдачи

$$h_m \approx \frac{h_c}{c_{p,\text{возд}}},$$

где h_c – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$; $c_{p,\text{возд}}$ – удельная теплоёмкость воздуха при постоянном давлении, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

Теплоотвод за счет излучения

$$q_{\text{изл}} = \epsilon\sigma(T_s^4 - T_{\text{окр}}^4),$$

где $\epsilon = 0,8$ – степень черноты стали; σ – постоянная Стефана–Больцмана; $T_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды.

Граничное условие на остальных поверхностях $\Omega_{\text{ест}}$, недоступных к охлаждению (подошва): теплоотвод происходит за счет естественной конвекции и излучения

$$-k(T)\frac{\partial T}{\partial n}\Big|_{\Omega_{\text{ест}}} = h_{\text{ест}}(T_s - T_{\text{окр}}) + \epsilon\sigma(T_s^4 - T_{\text{окр}}^4),$$

где $h_{\text{ест}}$ – коэффициент теплоотдачи при естественной конвекции, который зависит от чисел Грасгофа Gr и Прандтля Pr и принимается равным $15 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$.

Критерием прекращения моделирования выступает среднеинтегральная температура по всему сечению рельса $\bar{T}(t)$. Расчет прекращается, когда она достигает целевой температуры закрепления $T_{\text{закр}}$:

$$\bar{T}(t) = \frac{1}{A} \iint_{\Omega} T(x, y, t) dx dy \leq T_{\text{закр}},$$

где A – площадь поперечного сечения рельса.

Результаты моделирования

Моделирование было проведено для охлаждения рельса с $+60 \text{ }^\circ\text{C}$ до $+30 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ при использовании CAE-системы SolidWorks Simulation. Результаты расчета представлены в виде эпюры распределения температурного поля сечения рельса (рис. 2), а также в виде графика (рис. 3), отображающего время падения температуры рельса в наиболее значимых областях.

Как видно из представленной изокарты (рис. 2), к моменту прекращения охлаждения (или на 180-й секунде процесса) температурное поле по сечению рельса не является полностью однородным, демонстрируя температурные градиенты. Разница температур по всему сечению составляет от $\sim 27 \text{ }^\circ\text{C}$ до $\sim 32,4 \text{ }^\circ\text{C}$, что указывает на максимальный перепад около $5,4 \text{ }^\circ\text{C}$. Такой перепад считается приемлемым для большинства практических задач и минимизирует риски воз-

ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ДЛЯ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ВВОДА
РЕЛЬСОВЫХ ПЛЕТЕЙ В РАСЧЕТНУЮ ТЕМПЕРАТУРУ ЗАКРЕПЛЕНИЯ

никновения значительных внутренних напряжений при закреплении рельсовой плети [14, 15].

График (рис. 3) наглядно иллюстрирует, что даже при охлаждении большинства доступных поверхностей рельса (согласно конструкции установки, за исключением нижней части подошвы), тепло не успевает мгновенно равномерно распределиться по всему сечению рельса за отведенное время. Это приводит к небольшому температурному градиенту, где

центральные части рельса охлаждаются более интенсивно, чем его периферийные области, а также неохлаждаемая нижняя часть подошвы остается относительно горячей. Тем не менее достигнутый перепад в $\sim 5,5^\circ\text{C}$ свидетельствует о высокой степени равномерности охлаждения, что способствует точной оценке продольных напряжений при вводе плети в расчетную температуру закрепления.

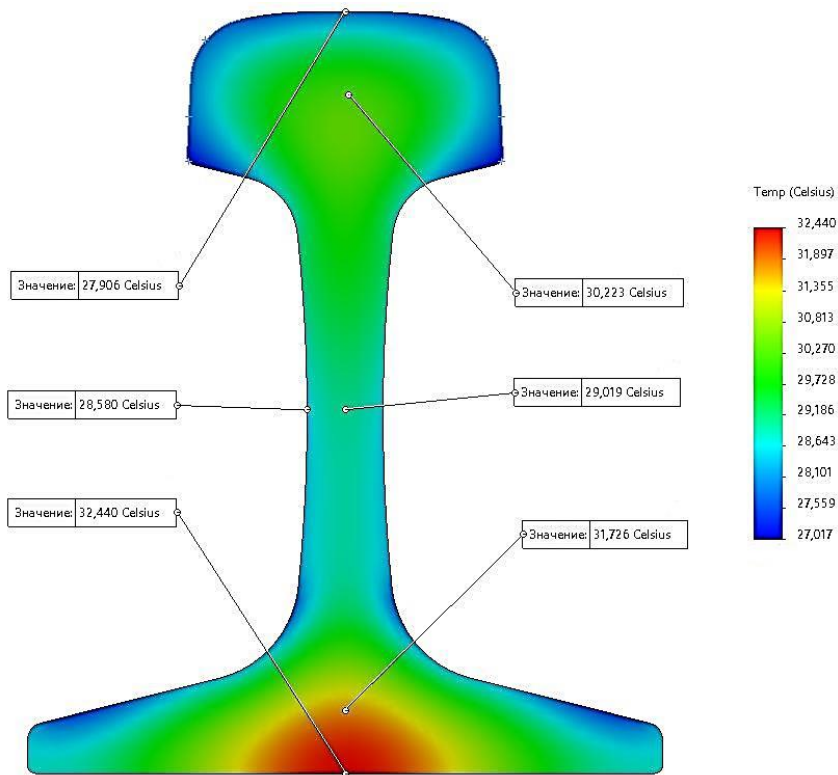


Рис. 2. Изокарта окончания процесса охлаждения (180 секунд)

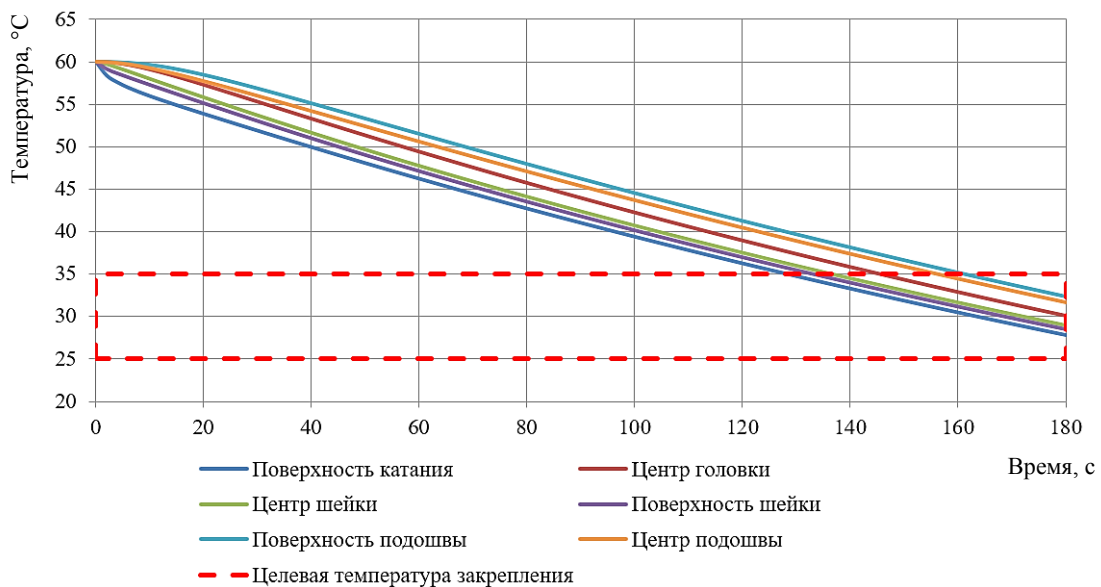


Рис. 3. График распределения температуры при охлаждении

Выводы

На основании проведенного математического моделирования комбинированного охлаждения рельсовой плети с использованием вихревой трубки и водяного распыления можно сделать следующие выводы.

1. *Актуальность проблемы*: представленная работа посвящена актуальной и критически важной задаче обеспечения безопасности и долговечности бесстыкового железнодорожного пути через точный ввод рельсовых плетей в расчетную температуру закрепления. В условиях жаркой погоды традиционные методы, такие как ожидание естественного охлаждения или использование гидравлических натяжителей, ограничивают производительность путевых работ.

2. *Эффективность комбинированного метода*: предложенный комбинированный метод охлаждения, сочетающий вынужденную конвекцию от вихревой трубки и испарение воды, демонстрирует высокий потенциал для быстрого снижения температуры рельса. Моделирование подтверждает возможность достижения целевой температуры закрепления за относительно короткое время.

3. *Приемлемая равномерность охлаждения*: анализ температурных полей (рис. 2) показывает, что при применении принудительного охлаждения большинства доступных поверхностей рельса достигается высокая степень однородности температурного поля. Наблюдаемый максимальный перепад температур составляет около 5,4 °C (от ~27 °C

до ~32,4 °C), что считается приемлемым для точного определения продольных напряжений и закрепления плети. Эта остаточная неравномерность обусловлена сложной геометрией рельса и различиями в эффективности теплоотвода на разных его поверхностях, в частности, исключением охлаждения нижней части подошвы.

4. *Перспективы оптимизации*: для дальнейшего совершенствования метода и достижения еще более идеальной равномерности охлаждения возможно проведение оптимизации геометрии и расположения охлаждающих элементов, а также рассмотрение возможности охлаждения всех поверхностей рельса, включая нижнюю часть подошвы, если это будет технологически реализуемо и экономически оправданно.

5. *Дальнейшие исследования*: представленная модель служит основой для дальнейших исследований, включая экспериментальную проверку и усовершенствование метода, а также анализ влияния остаточной неравномерности охлаждения на продольные напряжения в рельсовой плети после закрепления.

Таким образом, математическое моделирование подтверждает высокую эффективность и технологическую реализуемость предложенного метода комбинированного вихревого-водоиспарительного охлаждения. Разработанная технология обладает высоким потенциалом для внедрения в практику путевого хозяйства, предлагая современное решение для точного и эффективного управления температурным режимом рельсовых плетей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Альбрехт В.Г., Высоковский Н.П. Бесстыковой путь. Москва : Транспорт, 2000.
2. Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути : распоряжение ОАО «РЖД» от 14.12.2016 г. № 2544р.
3. Sood P.K. Theory and Design of Railway Track. Tata McGraw-Hill Education, 2006.
4. Zarembski, A.M. The Art and Science of Rail Grinding. Omaha : Simmons-Boardman Books, 2005. 288 p.
5. Selig P.A. Railroad Engineering and Maintenance. Boca Raton : CRC Press, 2013. 368 p.
6. Thomas B.G. Modeling of Steel Solidification and Cooling for Continuous Casting // Metallurgical and Materials Transactions B. 2002. Vol. 33. P. 795–812. doi:10.1007/s11663-002-0063-9
7. Eiamsa-ard E.C.E., Mahian S.P. A Review on the Applications and Fundamentals of Vortex Tubes // Applied Thermal Engineering. 2013. Vol. 50, Iss. 1. P. 143–154. doi:10.1016/j.rser.2007.03.006
8. Kish A., Samavedam G. Improved Destressing of Continuous Welded Rail for Better Management of Rail Neutral Temperature // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2005. Vol. 1916, Iss. 1. P. 56–65. doi:10.3141/1916-09
9. Kukulski J., Ratkiewicz A. Concept of Thermal Shrinkage-Resistant Railroad Rail for Use in Continuous Welded Rail Track // Applied Sciences. 2024. Vol. 14, Iss. 14. Art. 6172. doi:10.3390/app14146172
10. Pietrzyk M., Kuziak R. Numerical simulation of controlled cooling of rails as a tool for optimal design of this process // Computer Methods in Materials Science. 2012. Vol. 12, Iss. 4. P. 233–243. doi:10.7494/cmms.2012.4.0400
11. Heat Transfer Enhancement in Heat Exchangers by Longitudinal Vortex Generators: A Review of Numerical and Experimental Approaches / Y. Luo [et al.] // Energies. 2025. Vol. 18, Iss. 11. Art. 2896. doi:10.3390/en18112896
12. Kim, D.B., Park J.H., Lee K.B. Heat transfer enhancement for fin-tube heat exchanger using vortex generators // Journal of Mechanical Science and Technology. 2002. Vol. 16, Iss. 1. P. 109–115. doi:10.1007/BF03185161
13. Cebo A., Buczek A. The influence of selected parameters of water spray cooling on the heat transfer coefficient // Computer Methods in Materials Science. 2009. Vol. 9, Iss. 2. P. 20–206. doi:10.7494/cmms.2009.2.0231
14. Sommer K., Heinz R., Schöfer J. Thermal stresses and shakedown in wheel/rail contact // Archive of Applied Mechanics. 2003. Vol. 72, Iss. 10. P. 715–729. doi:10.1007/s00419-002-0255-4

15. Huang Z., Edwards J.R., Bass M.D.E.T. A review of non-destructive evaluation techniques for axial thermal stress and neutral temperature measurement in rail: Physical phenomena and performance assessment // *NDT & E International*. 2023. Vol. 137. Art. 102832. doi:10.1016/j.ndteint.2023.102832

REFERENCES

1. Albrecht V.G., Vysokovsky N.P. *Besstykovoy Put [Continuous Welded Rail Track]*. Moskva : Transport, 2005.
2. *Instruktsiya po ustrojstvu, ukladke, sodержaniyu i remontu besstykovogo puti [Instruction on the Installation, Laying, Maintenance, and Repair of Continuous Welded Rail Track]: rasporyazheniye OAO «RZhD» ot. 14.12.2016 g. № 2544r.*
3. Sood P.K. *Theory and Design of Railway Track*. Tata McGraw-Hill Education, 2006.
4. Zaremski A.M. *The Art and Science of Rail Grinding*. Omaha : Simmons-Boardman Books, 2005. 288 p.
5. Selig P.A. *Railroad Engineering and Maintenance*. Boca Raton : CRC Press, 2013. 368 p.
6. Thomas B.G. Modeling of Steel Solidification and Cooling for Continuous Casting // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2002. Vol. 33. P. 795–812. doi:10.1007/s11663-002-0063-9
7. Eiamsa-ard E.C.E., Mahian S.P. A Review on the Applications and Fundamentals of Vortex Tubes // *Applied Thermal Engineering*. 2013. Vol. 50, Iss. 1. P. 143–154. doi:10.1016/j.rser.2007.03.006
8. Kish A., Samavedam G. Improved Destressing of Continuous Welded Rail for Better Management of Rail Neutral Temperature // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2005. Vol. 1916, Iss. 1. P. 56–65. doi:10.3141/1916-09
9. Kukulski J., Ratkiewicz A. Concept of Thermal Shrinkage-Resistant Railroad Rail for Use in Continuous Welded Rail Track // *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, Iss. 14. Art. 6172. doi:10.3390/app14146172
10. Pietrzyk M., Kuziak R. Numerical simulation of controlled cooling of rails as a tool for optimal design of this process // *Computer Methods in Materials Science*. 2012. Vol. 12, Iss. 4. P. 233–243. doi:10.7494/cmms.2012.4.0400
11. Heat Transfer Enhancement in Heat Exchangers by Longitudinal Vortex Generators: A Review of Numerical and Experimental Approaches / Y. Luo [et al.] // *Energies*. 2025. Vol. 18, Iss. 11. Art. 2896. doi:10.3390/en18112896
12. Kim, D.B., Park J.H., Lee K.B. Heat transfer enhancement for fin-tube heat exchanger using vortex generators // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2002. Vol. 16, Iss. 1. P. 109–115. doi:10.1007/BF03185161
13. Cebo A., Buczek A. The influence of selected parameters of water spray cooling on the heat transfer coefficient // *Computer Methods in Materials Science*. 2009. Vol. 9, Iss. 2. P. 20–206. doi:10.7494/cmms.2009.2.0231
14. Sommer K., Heinz R., Schöfer J. Thermal stresses and shakedown in wheel/rail contact // *Archive of Applied Mechanics*. 2003. Vol. 72, Iss. 10. P. 715–729. doi:10.1007/s00419-002-0255-4
15. Huang Z., Edwards J.R., Bass M.D.E.T. A review of non-destructive evaluation techniques for axial thermal stress and neutral temperature measurement in rail: Physical phenomena and performance assessment // *NDT & E International*. 2023. Vol. 137. Art. 102832. doi:10.1016/j.ndteint.2023.102832

Информация об авторах

В.А. Нейман – аспирант кафедры «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные средства и оборудование»;
Д.С. Воронцов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные средства и оборудование».

Information about the authors

V.A. Neyman – Post-graduate Student, Department of Lifting-and-Transport, Construction and Road Machinery;
D.S. Vorontsov – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Lifting-and-Transport, Construction and Road Machinery.

Статья поступила в редакцию 28.07.2025; одобрена после рецензирования 17.09.2025; принята к публикации 17.09.2025.
The article was submitted: 28.07.2025; approved after reviewing: 17.09.2025; accepted for publication: 17.09.2025.

Научная статья
УДК 656.073
doi:10.31079/2415-8658-2025-4-80-85

КОНЦЕПЦИЯ ОРГАНИЗАЦИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕВОЗОК СБОРНЫХ ГРУЗОВ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОЛОГИИ КООПЕРАТИВНОЙ КОНСОЛИДАЦИИ

Некрасов Константин Викторович¹, Тихненко Сергей Александрович²

^{1,2} Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

¹ KVNeKrasov@usurt.ru

² Tikhnenko.s@gmail.com

Аннотация. Анализируется актуальная проблема организации железнодорожных перевозок мелких отправок (МО) в условиях роста спроса со стороны электронной коммерции и мелкосерийного производства. В качестве решения предлагается инновационная концепция кооперативной консолидации (железнодорожный пулинг), основанная на принципах экономики совместного использования. В отличие от традиционных хабо-ориентированных или автономных стратегий, модель предполагает децентрализованное объединение грузовой базы якорного отправителя с попутными грузами кооператоров в единую транспортную единицу с использованием цифровой платформы. Рассматриваются концептуальные основы технологии, роль участников процесса, и разрабатывается методика обоснования экономической целесообразности кооперации для якорного отправителя и кооператоров. Особое внимание уделяется формализации условий выгодности участия и факторов, влияющим на эффективность консолидации. Новизна исследования заключается в адаптации модели пуллинга к железнодорожным перевозкам и разработке теоретических основ для ее практической реализации.

Ключевые слова: железнодорожные перевозки, мелкие отправки, кооперативная консолидация, пулинг, якорный отправитель, кооператор, цифровая платформа, экономическая эффективность, транзакционные издержки

Original article

CONCEPT OF ORGANIZING RAILWAY TRANSPORTATION OF CONSOLIDATED CARGO UNDER COOPERATIVE CONSOLIDATION TECHNOLOGY

Nekrasov Konstantin V.¹, Tikhnenko Sergey A.²

^{1,2} Ural State Transport University, Ekaterinburg, Russia

¹ KVNeKrasov@usurt.ru

² Tikhnenko.s@gmail.com

Abstract. The article addresses the pressing issue of organizing railway transportation for small shipments (less-than-carload lots) amid growing demand from e-commerce and small-batch production. An innovative solution is proposed: a cooperative consolidation model (railway pooling), based on the principles of the sharing economy. Unlike traditional hub-based or autonomous strategies, this model involves the decentralized integration of an anchor shipper's cargo base with accompanying shipments from cooperators into a single transport unit using a digital platform. The conceptual foundations of the technology, the roles of the participants are examined and methods for assessing the economic feasibility of cooperation for both the anchor shipper and cooperators are developed. Particular attention is paid to formalizing the conditions for profitability and the factors affecting consolidation efficiency. The novelty of the research lies in adapting the pooling model to railway transport and developing a theoretical basis for its practical implementation.

Keywords: railway transportation, small shipments, cooperative consolidation, pooling, anchor shipper, cooperator, digital platform, economic efficiency, transaction costs

Введение

Проблема эффективной организации железнодорожных перевозок мелких отправок (МО) массой менее вагонной нормы представляет собой значительный научный и практический интерес [1–3]. Историческая ориентация железнодорожного транспорта на массовые перевозки сталкивается с современными вызовами, обусловленными ростом спроса на логистику электронной коммерции, поставки комплекующих и мелкосерийных товаров [4].

В настоящее время сложилось две базовые стратегии организации железнодорожных перевозок МО: стратегия накопления груза у отправителя и консолидация групповой отправки в специализированных узлах-хабах (грузовые дворы железнодорожных станций, терминалы экспедиционных предприятий или контейнерные терминалы).

Первая предполагает сознательную задержку отправки мелких партий грузов до достижения объема, достаточного для формирования полноценного вагона или контейнера. Данный подход применяется от-

правителями со стабильными, прогнозируемыми потоками несрочных грузов, таких как сырье или товары для региональных складов. Ключевой экономической компромисс заключается в минимизации транспортных издержек за счет вагонных тарифов, что сопровождается ростом затрат на складирование и имобилизацией оборотных средств.

Хабовая консолидация грузов от множества отправителей на специализированных узлах является более распространенной стратегией. В литературе по логистике она также обозначается терминами «ступица и спица» и терминальная перевозка [5–6]. Операционные преимущества хабовой консолидации обеспечиваются за счет эффекта масштаба при обработке массовых грузопотоков, снижения удельной стоимости перевозки мелких отправок, концентрации сортировочных операций на специализированных терминалах, минимизации простоев подвижного состава и оптимизации маршрутизации. Однако стратегия сопряжена со значительными капитальными затратами на создание и модернизацию терминальной инфраструктуры, а также эксплуатационными рисками, включая увеличение транзитного времени из-за двойной перевалки, рост риска повреждения грузов и зависимости от синхронизации работы смежных видов транспорта. Экономическая эффективность достигается лишь при высокой загрузке хабов, что ограничивает ее применение в регионах с низкой плотностью грузопотоков.

Развитие интеллектуальных систем и цифровых технологий обмена данными приводит к появлению новых логистических концепций. Одной из них становится модель, основанная на принципах экономики совместного использования (sharing economy) и предполагающая объединение ресурсов разных участников для повышения эффективности и устойчивости бизнеса [7–8].

На основе этого подхода предлагаем инновационную стратегию организации железнодорожных перевозок мелких отправок – кооперативную консолидацию, или железнодорожный пулинг (англ. pooling объединение).

Отметим, что понятие пулинга не является новым для теории и практики логистики. Такой подход реализован в рамках частного автотранспорта (платформа Blablacar) и фрагментарно в системе грузовых автоперевозок (платформа Pooling) [9]. Однако в железнодорожных перевозках данная технология не используется из-за отсутствия адаптированной нормативной базы, регулирующей взаиморасчеты и ответственность множества участников, а также цифровых платформ для управления совместными ресурсами в режиме реального времени.

Таким образом, кооперативная консолидация обладает большим нереализованным потенциалом, позволяет мелким отправителям получить выгоду от повагонных или контейнерных тарифов за счет совместного использования перевозочных ресурсов. Помимо очевидных выгод для малого бизнеса, эта

стратегия несет преимущества для транспортной системы в целом в связи со снижением нагрузки на терминальную инфраструктуру и повышением эффективности использования подвижного состава.

Концептуальные основы кооперативной консолидации мелких отправок железнодорожного транспорта

Технология кооперативной консолидации мелких отправок – это организационно-технологическая модель железнодорожных перевозок, основанная на синергетическом объединении грузовой базы якорного отправителя и попутных мелких грузов кооператоров в единую транспортную единицу (вагон или контейнер), обеспечивающая снижение удельной себестоимости перевозки для якоря за счет распределения постоянных затрат и предоставляющая кооператорам доступ к вагонным тарифам без промежуточных перевалок. В отличие от классических хабовых моделей, где консолидацией занимается нейтральный оператор, пулинг трансформирует одного из грузовладельцев в организатора процесса, создавая децентрализованную сеть взаимовыгодного сотрудничества.

Ключевыми отличиями технологии от экспедиторских схем являются:

- доминирующая роль грузовладельца (якоря) как организатора процесса;
- приоритет некоммерческой оптимизации над извлечением прибыли;
- цифровая автоматизация отбора грузов и распределения рисков.

Якорный отправитель (якорь) – юридическое лицо или индивидуальный предприниматель, иницирующий железнодорожную отправку собственного груза, который выступает:

- базовым объемом, обеспечивающим экономическую целесообразность использования вагона;
- организатором консолидации попутных грузов на своих инфраструктурных мощностях;
- единственным контрагентом перевозчика по договору перевозки, несущим солидарную ответственность за сохранность всех грузов в транспортной единице.

Кооператор – участник кооперативной консолидации, не обладающий ресурсами для самостоятельной организации вагонной отправки, который:

- размещает свой груз в незанятой части вместимости вагона якоря на условиях попутной транспортировки;
- сохраняет права бенефициарного грузовладельца при ограниченной ответственности (в пределах стоимости груза);
- компенсирует якорю операционные издержки по фиксированной тарифной схеме без участия в прибыли.

Взаимодействие якорного отправителя и кооператоров предлагается осуществлять на базе цифровой платформы. Введем понятие: *цифровая пу-*

линг-платформа мелких отправок – децентрализованная информационная система, обеспечивающая жизненный цикл кооперативной консолидации:

- через цифровые интерфейсы для инициирования сборных отправок и подключения к ним;
- смарт-контрактное управление обязательствами на базе распределенного реестра;
- интеграционные шлюзы с инфраструктурой РЖД;
- механизмы динамического ценообразования и страхования рисков.

Архитектурный принцип пулинг-платформы: «единое окно» для взаимодействия всех участников без посредников.

Для наглядного представления предложенной концепции на рисунке изображена архитектура цифровой пулинг-платформы и схема взаимодействия участников процесса кооперативной консолидации.

Процесс организации железнодорожных перевозок МО на базе пулинг-платформы включает следующие этапы:

- 1) инициация отправки: якорный отправитель через цифровую пулинг-платформу объявляет параметры предстоящей отправки (направление, сроки, свободный объем в вагоне (контейнере));
- 2) подключение кооператоров: мелкие отправители (кооператоры) регистрируют заявки, предоставляя данные о своих грузах;
- 3) виртуальная консолидация грузов: из пула заявок кооператоров отбираются грузы с учетом совместимости, весогабаритных параметров, экономической целесообразности групповой перевозки;
- 4) заключение смарт-контракта якорной компании с кооператорами: смарт-контракт регулирует ответственность сторон, порядок расчетов, страховые механизмы, порядок выдачи груза получателю и другие условия;

5) физическая консолидация: грузы доставляются автотранспортом на склад якорного отправителя к назначенному сроку, где осуществляется погрузка МО в вагон или контейнер по заранее разработанной схеме на этапе виртуальной консолидации;

б) железнодорожная перевозка: отправка осуществляется по заявке якорного отправителя, который единолично заключает договор с ОАО «РЖД» и оформляет сопроводительные документы;

7) распаковка: в пункте назначения осуществляется прямая выдача получателям или передача на дистрибуционный хаб.

Для успешной реализации технологии кооперативной консолидации на железнодорожном транспорте требуется решить ряд наукоемких задач и разработать следующее:

- модели прогнозирования спроса на мелкие отправки и оценки вероятности заполнения вагона при кооперативной консолидации;
- инструменты обоснования целесообразности кооперации для участников логистического процесса;
- механизмы взаимодействия грузовладельцев при кооперативной консолидации, направленные на повышение эффективности каждого из участников и снижение рисков взаимодействия;
- методику виртуальной консолидации мелких отправок и модели оптимизации загрузки вагона с учетом совместимости грузов и весогабаритных характеристик;
- нормативно-правовые условия реализации концепции;
- требования и техническое задание на разработку цифровой платформы грузового пулинга.

В настоящем исследовании решается одна из поставленных задач – разрабатывается методика обоснования целесообразности кооперации для каждого участника.

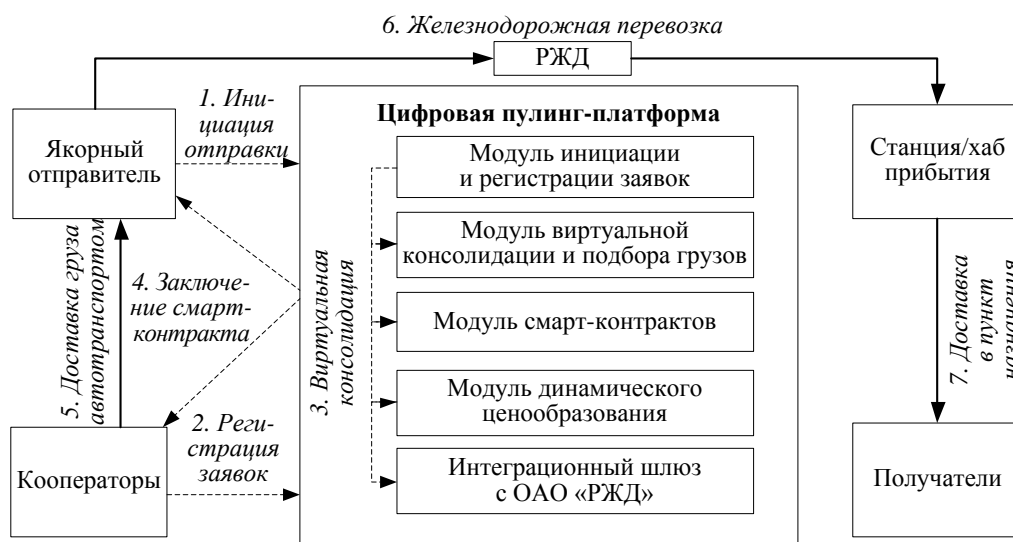


Рисунок. Архитектура цифровой пулинг-платформы и процесс кооперативной консолидации мелких отправок

Методика обоснования целесообразности кооперативной консолидации

При реализации технологии кооперативной консолидации мелких отправок железнодорожным транспортом требуется оценить ее эффективность для каждого участника и определить параметры подключения к кооперации.

Для якорного отправителя целесообразность кооперативной консолидации определяется экономической выгодой пулинга по сравнению с автономной отправкой (без присоединения попутных грузов кооператоров) и организацией отправки через хаб транспортной компании.

Стоимость отправки груза якорного отправителя при кооперативной консолидации будет определяться выражением

$$TC_{pul} = C_{жд} + C_T N - p \sum_{i=1}^N V_i, \quad (1)$$

где $C_{жд}$ – провозная плата повагонной (контейнерной) отправки, ден. ед.; C_T – транзакционные затраты взаимодействия с каждым кооператором, ден. ед.; N – число кооператоров; p – цена отправки 1 т груза кооператора; V_i – объем отправки i -го кооператора, т.

Транзакционные издержки включают затраты на оформление документов, проверку совместимости грузов, организацию временного хранения, погрузочно-разгрузочные операции и управление рисками. Общая сумма транзакционных затрат растет с увеличением числа кооператоров в консолидированной отправке.

Величину $C_{жд}$ в формуле (1) принимаем постоянной, так как повагонный (контейнерный) тариф является фиксированным для конкретного направления и типа подвижного состава независимо от степени его заполнения.

Выражение (1) справедливо при ограничении

$$\sum_{i=1}^N V_i \leq V_{max} - V_0, \quad (2)$$

где V_{max} – вместимость вагона (контейнера), т; V_0 – объем груза якорного отправителя, т.

Кооперативная консолидация выгодна якорному отправителю при выполнении условия

$$TC_{pul} < \min(TC_a, TC_x). \quad (3)$$

где TC_a – стоимость автономной отправки в неполностью загруженном вагоне, при этом в общем случае $TC_a = C_{жд}$; TC_x – стоимость отправки груза как мелкой отправки через хаб транспортной компании:

$$TC_x = p_x V_0, \quad (4)$$

где p_x – тариф хаба за отставку 1 т груза в сборном вагоне (контейнере).

Отсюда запишем систему условий целесообразности кооперативной консолидации для якорного отправителя:

$$\begin{cases} C_{жд} + C_T N - p \sum_{i=1}^N V_i \leq C_{жд}, \text{ при } \sum_{i=1}^N V_i \leq V_{max} - V_0, \\ C_{жд} + C_T \cdot N - p \sum_{i=1}^N V_i \leq p_x V_0. \end{cases} \quad (5)$$

Упрощая выражение (5), получим условие целесообразности кооперативной консолидации для якорного отправителя:

$$p \sum_{i=1}^N V_i \geq C_T N + \max(0, C_{жд} - p_x V_0). \quad (6)$$

Экономический смысл выражения (6): выручка якорного отправителя от подключения кооператоров $p \sum_{i=1}^N V_i$ должна покрыть транзакционные издержки взаимодействия с ними $C_T N$ и дополнительные затраты, если автономная отправка для якоря дороже, чем через хаб ($\max[0, C_{жд} - p_x V_0]$).

Из формул (1)–(6) следует, что с ростом числа подключаемых к отправке кооператоров растет её стоимость для якоря в связи с ростом издержек взаимодействия. При этом общая стоимость будет снижаться с ростом объема каждой мелкой отправки кооператоров. Таким образом, выгода якорного отправителя обеспечивается при подключении меньшего числа более крупных грузов, способных заполнить свободное пространство подвижного состава с меньшими транзакционными издержками.

Аналогично формализуем условие целесообразности подключения к пулингу каждого из кооператоров.

Для мелкого отправителя целесообразность кооперативной консолидации определяется экономической выгодой пулинга по сравнению с организацией отправки через хаб транспортной компании. То есть его выгода от участия в кооперации определяется условием $TC_{pul} \leq TC_x$, где TC_x определяется по формуле (4). Если затраты на подвоз МО в хаб и на склад якоря одинаковы или отличаются несущественно, то максимальная цена пулинга p_{max} , при которой кооператор будет готов присоединиться к кооперации, будет равна тарифу хаба p_x .

При известных C_T , N , V , $C_{жд}$ и p_x минимальную цену присоединения к кооперативной консолидации, устанавливаемую якорем, можем определить по формуле

$$p_{min} = \frac{C_T N + C_{жд} - p_x V_0}{\sum_{i=1}^N V_i}. \quad (7)$$

То есть цена за отправку 1 т груза кооператора в составе групповой отправки должна быть не менее p_{\min} , в противном случае кооперативная консолидация якорному отправителю невыгодна.

Аналогично можем определить минимальный объем груза якоря V_0 , при котором ему целесообразно инициировать кооперативную консолидацию:

$$V_0^{\min} = \frac{C_T N + C_{\text{жд}} - p \sum_{i=1}^N V_i}{p_x}. \quad (8)$$

То есть если у якорного отправителя есть свой груз в объеме не менее V_0^{\min} , кооперативная консолидация для него выгодна для заполнения оставшегося свободного объема вагона (контейнера). В противном случае груз целесообразно отправлять через хаб посредника.

Формулы (7) и (8) справедливы, если величины N и V_i заранее известны. Однако до момента консолидации эти величины являются случайными, прогнозировать их можно с определенной вероятностью. Соответственно и $TC_{\text{пул}}$ на этапе планирования отправки есть случайная величина. Поэтому обосновать V_0^{\min} и p_{\min} можно только на основе имитационного моделирования. Разработка имитационной модели оптимизации параметров кооперативной консолидации является предметом дальнейших исследований.

Выводы

Технология кооперативной консолидации мелких отправок на железнодорожном транспорте представляет собой перспективное направление развития логистики, способное обеспечить переход от точечной оптимизации к сетевой эффективности. Ключевое

преимущество подхода – устранение дорогостоящего посредника в лице классического логистического оператора. Это достигается за счёт того, что якорный отправитель, инициирующий отправку своего собственного груза, берёт на себя роль организатора, предоставляя свободную ёмкость своего вагона другим участникам. Взамен он получает компенсацию операционных издержек по фиксированному тарифу, а кооператоры – доступ к вагонным ставкам, которые существенно ниже сборных тарифов хаба.

Реализация потенциала кооперативной консолидации требует не только технологических инвестиций, но и регуляторной поддержки, а также разработки отраслевых стандартов обмена данными. Для России это направление может стать драйвером предоставления мелким отправителям доступа к логистике уровня крупных корпораций, что будет способствовать повышению эффективности использования подвижного состава и снижению нагрузки на терминальную инфраструктуру.

Проставленная в настоящей работе методика обоснования целесообразности кооперативной консолидации формализует условия экономической выгоды от участия в пуллинге по сравнению с автономной отправкой или отправкой через хаб, а также позволяет обосновать ценовые и объёмные параметры консолидации.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на имитационное моделирование логистических процессов консолидации, апробацию предложенных моделей и методов, а также разработку конкретных механизмов внедрения кооперативной консолидации в практику железнодорожных перевозок.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Боцвин Д.В., Ковалев Г.А., Мамаев Э.А. Организация сборных контейнерных перевозок на железнодорожном транспорте // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2012. № 2(46). С. 119–125.
2. Изотов О.А., Кузнецов А.Л. Перспективы развития технологий перевозки сборных грузов в контейнерах // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2020. № 1. С. 140–148. (Морская техника и технология).
3. Некрасов К.В., Тихненко С.А. Исследование перспектив развития железнодорожных перевозок сборных грузов на основе интеллектуальных технологий // Логистика. 2025. № 4(221). С. 30–32.
4. Матненко Н.Н., Сальникова Т.С., Месяков Ю.А. Развитие рынка электронной коммерции в условиях цифровизации экономики // Экономические системы. 2024. Т. 17, № 4. С. 39–50.
5. An Y., Zhang Y., Zeng B. The reliable hub-and-spoke design problem: Models and algorithms // Transportation Research. Part B. Methodological. 2015. Т. 77. Pp. 103–122.
6. Покровская О.Д., Воскресенский И.В. Алгоритмизация комплексного расчета параметров терминальной сети региона // Транспорт Урала. 2011. № 1(28). С. 10–13.
7. Duan C. Thematic evolution, emerging trends for sharing economy business model research, and future research directions in the post-COVID-19 era // R&D Management. 2024. Т. 54, № 5. Pp. 1104–1130.
8. Кочнева Д.И., Пономарев Н.Ю. Оптимизация схемы возврата порожних контейнеров путем использования системы контейнершеринга // Инновационный транспорт. 2023. № 3(49). С. 64–68.
9. Колкарева И.Н., Аверьянова К.А. Регулирование отношений карпулинга в России и в мире // Сборник научных статей профессорско-преподавательского состава и студентов Российских научно-образовательных учреждений. Берлин: West-Ost-Verlag, 2021. С. 239–253.

REFERENCES

1. Botsvin D.V., Kovalev G.A., Mamaev E.A. Organizatsiya sbornykh konteynernykh perevozok na zheleznodorozhnom transporte [Organization of consolidated container transportation by rail] // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2012. № 2(46). S. 119-125.
2. Izotov O.A., Kuznetsov A.L. Perspektivy razvitiya tekhnologij perevozki sbornykh грузов v konteynerakh [Prospects for the development of technologies for the transportation of consolidated cargo in containers] // Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2020. № 1. S. 140–148. (Morskaya tekhnika i tekhnologiya).
3. Nekrasov K.V., Tikhnenko S.A. Issledovanie perspektiv razvitiya zheleznodorozhnykh perevozok sbornykh грузов na osnove intellektual'nykh tekhnologij [Research of the prospects for the development of railway transportation of consolidated cargo based on intelligent technologies] // Logistika. 2025. № 4(221). S. 30–32.
4. Matnenko N.N., Sal'nikova T.S., Mezyakov Yu.A. Razvitie rynka elektronnoj kommertsii v usloviyakh tsifrovizatsii ekonomiki [Development of the e-commerce market in the context of economy digitalization] // Ekonomicheskie sistemy. 2024. T. 17, № 4. S. 39–50.
5. An Y., Zhang Y., Zeng B. The reliable hub-and-spoke design problem: Models and algorithms // Transportation Research Part B: Methodological. 2015. Vol. 77. P. 103–122.
6. Pokrovskaya O.D., Voskresenskij I.V. Algoritmizatsiya kompleksnogo rascheta parametrov terminal'noj seti regiona [Algorithmization of the complex calculation of the regional terminal network parameters] // Transport Urala. 2011. № 1(28). S. 10-13.
7. Duan C. Thematic evolution, emerging trends for sharing economy business model research, and future research directions in the post-COVID-19 era // R&D Management. 2024. Vol. 54, № 5. P. 1104-1130.
8. Kochneva D.I., Ponomarev N.Yu. Optimizatsiya skhemy vozvrata porozhnykh kontejnerov putem ispol'zovaniya sistemy konteynersheringa [Optimization of the empty container return scheme by using a container sharing system] // Innovatsionnyj transport. 2023. № 3(49). S. 64–68.
9. Kolkareva I.N., Averyanova K.A. Regulyrovaniye otnoshenij karpulinga v Rossii i v mire [Regulation of carpooling relations in Russia and in the world] // Sbornik nauchnykh statej professorско-prepodavatel'skogo sostava i studentov Rossiyskikh nauchno-obrazovatel'nykh uchrezhdeniy. Berlin : West-Ost-Verlag, 2021. S. 239–253.

Информация об авторах

К.В. Некрасов – кандидат экономических наук, доцент кафедры «Мировая экономика и логистика»;
С.А. Тихненко – аспирант кафедры «Мировая экономика и логистика».

Information about the authors

K.V. Nekrasov – Candidate of Science (Economics), Associate Professor, Department of World Economy and Logistics;
S.A. Tikhnenko – Post-graduate Student, Department of World Economy and Logistics.

Статья поступила в редакцию 26.08.2025; одобрена после рецензирования 08.10.2025; принята к публикации 08.10.2025.
The article was submitted: 26.08.2025; approved after reviewing: 08.10.2025; accepted for publication: 08.10.2025.

Научная статья
УДК 625.11
doi:10.31079/2415-8658-2025-4-86-90

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОФИЛЕЙ ОСАДОК ОСНОВАНИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ НАСЫПЕЙ ИЗ ГРУНТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Оденбах Ирина Александровна¹, Панов Евгений Игоревич²

^{1,2} Оренбургский институт путей сообщения – филиал Приволжского государственного университета путей сообщения, Оренбург, Россия,

¹ irina.odnbakh23@gmail.com

² e.i.panov@yandex.ru

Аннотация. Насыпи являются важным компонентом железнодорожной инфраструктуры: они поднимают уровень транспортного полотна над уровнем земли и позволяют построить проектный профиль трассы на холмистой местности. Долгосрочная стабильность и осадки насыпей, особенно на слабых грунтах, представляют собой геотехнические проблемы для инженеров-железнодорожников – даже небольшая осадка насыпи может поставить под угрозу безопасность движения поездов. Поэтому особую актуальность приобретают вопросы моделирования и определения величины осадок железнодорожных насыпей. Рассмотрены особенности определения профилей осадок оснований железнодорожных насыпей из грунтовых материалов. В процессе исследования получены аналитические зависимости, необходимые для расчета осадок оснований железнодорожных насыпей при проектировании для строительства объектов. Кроме того, сделано предположение, что определяющим параметром для развития деформаций, помимо величины напряжения, является скорость циклического напряженного состояния насыпи.

Ключевые слова: насыпь, осадка, напряженное состояние, движение, поезд, железная дорога, грунт

Original article

DETERMINATION OF THE SETTLEMENT PROFILES OF RAILWAY EMBANKMENTS MADE OF SOIL MATERIALS

Odenbakh Irina A.¹, Panov Evgeny I.²

^{1,2} Orenburg Institute of Railways – branch of Volga State University of Railways, Orenburg, Russia

¹ irina.odnbakh23@gmail.com

² e.i.panov@yandex.ru

Abstract. Embankments are an important component of railway infrastructure, as they raise the level of roadbed above the ground level and allow a designed profile of a route to be built on hilly terrain. The long-term stability and settlement of embankments, especially on weak soils, pose geotechnical challenges for railway engineers. Even a small amount of embankment settlement can jeopardise the safety of train traffic. Therefore, issues related to modelling and determining the settlement quantity of railway embankments are of particular relevance. Taking into account the above, the article discusses the features of determining the settlement profiles of railway embankments' bases made of soil materials. The study describes analytical dependencies that allow determining the parameters of railway embankment base settlement necessary for calculation, design, construction, and operation. In addition, it is assumed that besides the magnitude of stress, the determining parameter for the development of deformations is the rate of cyclic stress state of the embankment.

Keywords: embankment, settlement, stress state, movement, train, railway, soil

Введение

Инженеры-конструкторы, проектирующие железнодорожную инфраструктуру, стремятся создавать более безопасные, качественные и долговечные дороги, которые будут экономичными, надежными и устойчивыми к изменению климата. В то же время лица, ответственные за обслуживание существующих железнодорожных сетей, сталкиваются с растущим разрывом между потребностями ухудшающейся сети и сокращенными бюджетами на ее техническое обслуживание. В данном контексте особое внимание заслуживает строительство железно-

рожных насыпей, которые представляют собой важнейший компонент проектирования и обслуживания железнодорожных систем [1].

Насыпь образует фундамент для железнодорожного пути и связанных с ним сооружений, а ее стабильность имеет первостепенное значение для безопасности и комфорта транспортировки людей и грузов. Проектирование насыпей требует тщательного планирования и расчетов. Если ожидается высокая интенсивность движения, конструкция насыпи должна иметь достаточную несущую способность, чтобы её выдержать [2]. С учетом отме-

ченного, следует акцентировать внимание на том, что одной из наиболее распространенных проблем при строительстве и обслуживании железнодорожных насыпей является осадка, которая происходит, когда грунт под насыпью подвергается сжатию под приложенной вибродинамической нагрузкой, создаваемой движением поездов. Это приводит к деформации, вызывающей нарушение профиля, неравномерность хода и дорогостоящий ремонт. Железнодорожные насыпи, построенные на слабых глинистых грунтах, таких как глина, торф или ил, особенно подвержены осадке. Эти грунты обладают высокой сжимаемостью и низкой прочностью на сдвиг, что усугубляет риск чрезмерной осадки в условиях динамической нагрузки.

Ниже представлены кратко систематизированные последствия осадок железнодорожных насыпей (таблица).

Таким образом, вопросы, связанные с оценкой рисков и учетом возможных проблем проектирования и эксплуатации железнодорожных насыпей, обеспечением качественного геотехнического инжиниринга и достижением стабильности полотна, достоверным прогнозированием осадки железнодорожных путей, являются актуальными, теоретически и практически значимыми.

Систематические исследования законов деформации насыпи, которые включают описание подходов к

проверке эксплуатационных характеристик насыпей, представлены работами Baolong Li, Lulu Jiang [3], Caolin Qing, Shaolong Jie [4], А.В. Петряева, В.Н. Пармонова [5].

Процедуру испытаний для анализа поведения двумерной системы «насыпь–грунт» в зависимости от высоты насыпи и толщины неразжижаемого слоя основания описывают Changzi Qu, Jing Zhao [6], З.Т. Фазилова [7], J.N. Varandas, Y. Zhang [8].

Несмотря на имеющиеся публикации и активный интерес ученых к рассматриваемой проблематике, ряд вопросов требует дополнительного исследования. Например, в уточнении и дальнейшем развитии нуждаются эмпирические модели, используемые для прогнозирования и оценки осадки грунта, которые в большинстве своем предполагают, что балласт и материалы земляного полотна подвергаются циклическим нагрузкам эквивалентной величины, однако, в реальной жизни это не так, поскольку неровности пути изменяются с каждым проходом оси. Кроме того, отдельного внимания заслуживают подходы к определению аккумулятивной осадки насыпей, построенных с использованием тоннельного грунта.

Таким образом, цель статьи заключается в изучении особенностей определения профилей осадок основ железнодорожных насыпей из грунтовых материалов.

Таблица

Анализ последствий осадок железнодорожных насыпей

Показатель	Характеристика	Примеры и технические данные
Причины деформаций	1. Природные факторы: осадки, паводки, сейсмическая активность 2. Техногенные факторы: некачественные грунты, ошибки проектирования, изменение уровня грунтовых вод (например, из-за строительства)	1. Размывы: в 2024 г. в России в Республике Коми произошёл сход поезда из-за размыва насыпи, что привело к человеческим жертвам 2. Просадки: в Китае и на Тайване просадки грунта под высокоскоростными линиями достигали 70–80 мм/год из-за чрезмерного забора грунтовых вод
Последствия	1. Аварии и инциденты с человеческими жертвами и значительным материальным ущербом. 2. Снижение скорости движения поездов на опасных участках 3. Постоянные эксплуатационные затраты на ремонт и обслуживание	1. Критические осадки: даже небольшая деформация пути может привести к сходу с рельсов 2. Снижение скорости: для участков с повышенным риском деформации скорость движения снижается до 25–40 км/ч, что вызывает задержки в расписании
Ремонтные работы и их стоимость	1. Мелкий ремонт (рихтовка и подбивка балласта): регулярные операции, которые могут проводиться несколько раз в год 2. Капитальный ремонт (усиление насыпи): дорогостоящие и длительные работы	1. Стоимость подбивки: на отдельных участках достигает 500 тыс. руб. за выправку 1 км пути 2. Затраты на усиление: применение геосинтетических материалов, инъектирование или переустройство дренажа 3. Отношение затрат: в некоторых случаях затраты на ремонт насыпей за 30 лет могут в 3,7 раза превысить первоначальные вложения
Прогнозирование	1. Без мониторинга: дефекты обнаруживаются только при визуальном осмотре или после инцидента 2. С мониторингом: использование беспроводных сенсоров, дронов и спутниковых систем InSAR для раннего выявления деформаций	1. Раннее предупреждение: современные технологии позволяют выявить деформации на начальной стадии, когда осадка составляет 30–50 мм/год, что предотвращает дальнейшее разрушение

Основная часть

Прежде всего отметим, что осадки железнодорожных насыпей часто являются результатом слабых или плохо уплотненных грунтов, испытывающих сжатие от веса самой насыпи и находятся под воздействием нагрузки, создаваемой проходящими поездами. Во многих случаях грунт под насыпью может подвергаться уплотнению, особенно в мелкозернистых грунтах, имеющих низкую проницаемость и высокую сжимаемость [4]. По мере осадки насыпи приложенная нагрузка приводит к сближению частиц грунта, что влечет за собой уменьшение объема и увеличение плотности грунта. В результате появляется дифференциальное оседание, при котором некоторые части насыпи оседают больше, чем другие, что может вызвать смещение рельсов и другие структурные проблемы. Помимо уплотнения, такие факторы, как влажность, условия дренажа и цикл заморозания-оттаивания, могут усугубить осадку.

На рис. 1 схематически представлены факторы, определяющие возникновение предельных состояний оседания насыпи, к числу которых относятся: нагрузка от железнодорожного движения, геометрия насыпи, а также геотехнические условия.

С учётом вышеизложенного, проектировщику следует до начала моделирования профилей осадок выяснить основные аспекты, включающие в себя условия нагрузки, проектную геометрию, любые другие внедренные изменения, а также геологические условия. Модель, отражающая накопление

постоянной деформации в гранулированных материалах в зависимости от основных свойств самого материала и трехосного напряженного состояния, действующего на объем материала, является основным компонентом прогнозирования осадки балластного слоя насыпи. Для того чтобы прогнозы поведения были достоверны для новых конструкций и грунтов, а также при новых транспортных нагрузках, необходима точная зависимость от основных свойств материала.

На рис. 2 изображены комбинации циклического эффективного напряжения и статического давления, при которых возникают различные профили осадок основ железнодорожных путей. Для прогнозирования осадки основной интерес представляет режим с циклическими постоянными деформациями и в частности то, как эта область изменяется с количеством циклов нагрузки.

Для моделирования профилей осадок предлагается использовать метод конечных элементов с волновым числом (также известный как двумерно-полумерный подход), являющийся вычислительно эффективным подходом для решения трехмерных задач: две размерности решаются с помощью теории конечных элементов, а третья – аналитически. Поэтому он хорошо подходит для трехмерных структур, которые можно аппроксимировать как имеющие неизменную геометрию и свойства материала в одном направлении (например, железные дороги, автомагистрали и туннели) [2].



Рис. 1. Основные факторы, влияющие на осадку железнодорожных насыпей [8]

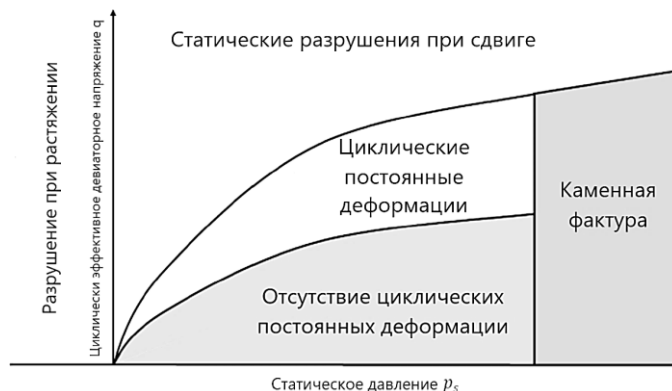


Рис. 2. Различные типы деформаций, возникающие в балластных материалах в зависимости от статического и циклического напряженного состояния [8]

Предполагая, что конструкция является линейной и упругой, уравнения движения можно решить в области волновых чисел и частот. Двойное преобразование Фурье используется для преобразования всех переменных в область волновых чисел и частот с учетом направления x движения поезда и времени t . В соответствии с общей формулировкой конечных элементов, следующее уравнение равновесия представляет любую точку в трехмерной области:

$$\int_v \delta \varepsilon \sigma dV + \int_v \delta u \rho \frac{\partial^2 u_i(x,t)}{\partial t^2} dV = \int_s \delta u p dS, \quad (1)$$

где $\delta \varepsilon$ – поле виртуальных деформаций; σ – поле напряжений; δu – поле виртуальных перемещений;

$$\int_v \delta \varepsilon \sigma dV = \int_{k_x} \delta u_n^T(-k_x, \omega) \int_z \int_y B^T(-k_x) D B(k_x) dy dz u_n(k_x, \omega) dk_x; \quad (2)$$

$$\int_v \delta u \rho \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} dV = -\omega^2 \int_{k_x} \delta u_n^T(-k_x, \omega) \int_z \int_y N^T \rho N dy dz u_n(k_x, \omega) dk_x, \quad (3)$$

где B – матрица, содержащая производные функций формы конечных элементов; D – матрица упругости; N – матрица функций формы; u_n – вектор смещения узлов в преобразованной области.

$$\int_s \delta u p dS = \int_{k_x} \delta u_n^T(-k_x, \omega) \int_s N^T p(k_x, \omega) ds dk_x = \int_{k_x} \delta u_n^T(-k_x) p_n(k_x, \omega) dk_x. \quad (4)$$

Далее расчет осадки основания грунтового насыпа на расчетной вертикали S_j , выполняется согласно следующим по формулам:

$$\begin{cases} S_j = 0,8 \sum_{i=1}^n S_i(x_j); \\ S_i(x_j) = \frac{W(x_j, z_{i+1}) - W(x_j, z_i)}{E_i}, \end{cases} \quad (5)$$

где S_j – осадка подошвы насыпи на расчетной вертикали, расположенной на расстоянии x_j от левого края насыпи; $\beta = 0,8$; $S_i(x_j)$ – осадка слоя основания толщиной $h_i = z_{i+1} - z_i$, кровля которого находится на глубине z_i , а подошва – на глубине z_{i+1} ; $W(x, z)$ – перемещение основания в точке с координатами x – по горизонтали и z – по вертикали; $W(x_j, z_i)$ и $W(x_j, z_{i+1})$ – оседание соответственно кровли и подошвы i -го грунтового слоя основания с модулем деформации E_i .

Расчеты постоянной деформации и осадки выполняются на этапе постобработки с использованием статических и циклических напряжений, определяемых как разница между напряжениями в конце этапов нагружения и гравитации. Тензор постоянной деформации оценивается во всех точках интегрирования каждого элемента путем численного интегрирования уравнения скорости поезда

$$\frac{d\varepsilon_{ij}}{dN} = \frac{dk_f}{dN} n_{ij}^f + \frac{dk_v}{dN} \delta_{ij},$$

где k_f и k_v – исторические параметры, учитывающие различные типы деформаций; δ_{ij} – дельта Кронекера; n_{ij}^f – направления постоянных деформаций при трении скольжения.

u – поле перемещений; ρ – плотность массы; p – приложенная нагрузка.

Уравнение (1) можно переписать в терминах узловых переменных, поскольку непреобразованное поперечное сечение области дискретизируется в конечные элементы. Затем, с учетом теоремы Парсеваля, концепция виртуальной работы применяется к области преобразования. Функции Фурье-образов x и t определяются как волновое число и частота, обозначенные соответственно k_x и ω . Поэтому в преобразованной области виртуальная работа внутренних напряжений и инерционных сил равна:

Используя дискретизацию конечных элементов на плоскости YZ и рассматривая координату S , параллельную краю элемента, на который действует тяга, можно определить, что виртуальная работа, вызванная нагрузкой, равна:

Перемещение основания $W(x, z)$ на расчетной глубине может быть определено с использованием следующих формул:

$$\begin{aligned} W(x, z) &= k_1(\xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \xi_4 + \xi_5 + \xi_6 + \\ &+ \xi_7 + \xi_8 + \xi_9 + \xi_{10} - \xi_{11} + \xi_{12}); \\ k_1 &= \frac{y_r^h}{2\pi L_1 y_4}; y_1 = -L_1 - b_1 + x_j; \\ y_2 &= -L_1 + x_j; y_3 = b - x_j; \\ y_4 &= b - L_1 - b_1; \\ \xi_1 &= -L_1 y_1^2 \ln(y_1^2 + z^2); \\ \xi_2 &= -y_2^2 y_4 \ln(y_2^2 + z^2); \\ \xi_3 &= L_1 - y_3^2 \ln(y_3^2 + z^2); \\ \xi_4 &= -2 z L_1 y_1 \arctg\left(\frac{y_1}{z}\right); \\ \xi_5 &= -2 z y_2 y_4 \arctg\left(\frac{y_4}{z}\right); \\ \xi_6 &= 2 z L_1 y_3 \arctg\left(\frac{y_3}{z}\right); \\ \xi_7 &= x_j^2 y_4 \ln(x_j^2 + z^2); \\ \xi_8 &= 2 x_j z y_4 \arctg\left(\frac{x_j}{z}\right); \\ \xi_9 &= 2 L_1 y_1^2 \ln(-y_1); \\ \xi_{10} &= 2 y_2^2 y_4 \ln(-y_2); \\ \xi_{11} &= 2 L_1 y_3^2 \ln(y_3); \\ \xi_{12} &= 2 x_j^2 y_4 \ln(x_j). \end{aligned}$$

Выводы

Осадки оснований железнодорожных насыпей на слабых грунтах являются серьезной проблемой для обеспечения долгосрочной стабильности и безопасности транспортных инфраструктурных объектов.

DETERMINATION OF THE SETTLEMENT PROFILES OF RAILWAY EMBANKMENTS MADE OF SOIL MATERIALS

Важный аспект в данном контексте – точное прогнозирование и моделирование различных профилей осадок оснований железнодорожных грунтовых насыпей.

Приведены результаты напряженного состояния насыпи, рассчитанного методом конечных элементов, которые используются для расчета деформаций, вызванных вибродинамическим движением поездов. Деформации в заключительном шаге расчёта преобразуются в остаточные перемещения, определяющие

величину осадки. В рамках проведенного исследования предполагается, что определяющим параметром для развития постоянной деформации, помимо величины напряжения, является не только сама частота, но и скорость циклического напряженного состояния. Это направление требует более детального дальнейшего изучения, что позволит полностью количественно учесть скорость движения поездов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Церех С.Г., Овчинников И.Г. Деформация участка переменной жесткости при отрицательных температурах // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2022. № 2. С. 82–88. doi:10.15593/24111678/2022.02.10
2. Зайцев А.А. Решение задачи усиления земляного полотна железных дорог, подверженного деформациям пучин, просядок и осадок на слабых основаниях // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2023. № 2(119). С. 6–18. doi:10.26110/ARCTIC.2023.119.2.001
3. Baolong Li, Lulu Jiang. Study on the Deformation Characteristics of Railway Subgrade Structures Induced by Groundwater Level Changes // *Advances in Civil Engineering*. 2025. Vol. 20, Issue 1. doi:https://doi.org/10.1155/adce/5559122
4. Caolin Qing, Shaolong Jie. Freezing Damage Control of Railway Subgrade Miniature Shields in Cold Climatic Regions: Construction Technology Optimization via Numerical Simulation // *Advances in Civil Engineering*. 2023. Vol. 2023, Issue 1. doi:https://doi.org/10.1155/2023/8828952
5. Петряев А.В., Парамонов В.Н. Расчетный анализ поведения подшпального основания при его стабилизации геосинтетическими материалами // Транспорт Урала. 2022. № 1(72). С. 62–67.
6. Changzi Qu, Jing Zhao. Accumulative Plastic Deformation of the Improved Completely Weathered Granite Subgrade in High-Speed Railway // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2022. Vol. 16, Issue 1. doi:https://doi.org/10.1155/2022/6187140
7. Фазилова З.Т. Влияние анизотропных свойств верхнего строения железнодорожного пути на параметры динамической осадки предмостовых участков // Мир транспорта. 2023. Т. 21, № 3(106). С. 50–58. doi:10.30932/1992-3252-2023-21-3-4
8. Varandas J.N., Zhang Y. Differential settlements monitoring in railway transition zones using satellite-based remote sensing techniques // *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2025. Vol. 34. doi:https://doi.org/10.1111/mice.13511

REFERENCES

1. Tserekh S.G., Ovchinnikov I.G. Deformatsiya uchastka peremenoj zhestkosti pri otritsatel'nykh temperaturakh [Deformation of a section of variable rigidity at negative temperatures] // *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya*. 2022. № 2. S. 82–88. doi: 10.15593/24111678/2022.02.10
2. Zaitsev A.A. Resheniye zadachi usileniya zemlyanogo polotna zheleznykh dorog, podverzhennogo deformatsiyam puchin, prosadok i osadok na slabykh osnovaniyakh [Solution to the problem of strengthening the roadbed of railways subject to deformations of heaving, subsidence and settlement on weak foundations] // *Nauchny vestnik Yamalo-Nenetskogo Avtonomnogo Okruga*. 2023. № 2 (119). S. 6–18. doi: 10.26110/ARCTIC.2023.119.2.001
3. Baolong Li, Lulu Jiang. Study on the Deformation Characteristics of Railway Subgrade Structures Induced by Groundwater Level Changes // *Advances in Civil Engineering*. 2025. Vol. 20, Issue 1. doi:https://doi.org/10.1155/adce/5559122
4. Caolin Qing, Shaolong Jie. Freezing Damage Control of Railway Subgrade Miniature Shields in Cold Climatic Regions: Construction Technology Optimization via Numerical Simulation // *Advances in Civil Engineering*. 2023. Vol. 2023, Issue 1. doi:https://doi.org/10.1155/2023/8828952
5. Petryaev A.V., Paramonov V.N. Raschetny analiz povedeniya podshpal'nogo osnovaniya pri ego stabilizatsii geosinteticheskimi materialami [Calculation analysis of the behavior of the sleeper base when it is stabilized with geosynthetic materials] // *Transport Urala*. 2022. № 1 (72). S. 62–67.
6. Changzi Qu, Jing Zhao. Accumulative Plastic Deformation of the Improved Completely Weathered Granite Subgrade in High-Speed Railway // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2022. Vol. 16, Issue 1. doi:https://doi.org/10.1155/2022/6187140
7. Fazilova Z.T. Vliyanie anizotropnykh svoystv verkhnego stroeniya zheleznodorozhnogo puti na parametry dinamicheskoy osadki predmостovykh uchastkov [Influence of anisotropic properties of the superstructure of a railway track on the parameters of dynamic settlement of pre-bridge sections] // *Mir Transporta*. 2023. T. 21. № 3 (106). S. 50–58. doi:10.30932/1992-3252-2023-21-3-4
8. Varandas J.N., Zhang Y. Differential settlements monitoring in railway transition zones using satellite-based remote sensing techniques // *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2025. Vol. 34. doi:https://doi.org/10.1111/mice.13511

Информация об авторах

И.А. Оденбах – кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Логистика и транспортные технологии»;
Е.И. Панов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Логистика и транспортные технологии».

Information about the authors

I.A. Odenbakh – Candidate of Science (Pedagogy), Associate Professor of the Department of Logistics and Transport Technologies;
E.I. Panov – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Logistics and Transport Technologies.

Статья поступила в редакцию 26.09.2025; одобрена после рецензирования 08.11.2025; принята к публикации 08.11.2025.
The article was submitted: 26.09.2025; approved after reviewing: 08.11.2025; accepted for publication: 08.11.2025.

Научная статья
УДК 681.7.068
doi:10.31079/2415-8658-2025-4-91-97

ВОЗДЕЙСТВИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ВИБРАЦИЙ ОТ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ПОДВЕСНОЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ КАБЕЛЬ

Савин Евгений Зиновьевич

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия, ev.savin.49@mail.ru

Аннотация. Волоконно-оптический кабель (ВОК), подвешенный на опорах контактной сети, подвержен влиянию многих внешних факторов, среди которых необходимо отметить механические вибрации, возникающие при движении поездов по не идеально ровной поверхности катания рельсов. Эти колебания находятся в низкочастотном диапазоне, а по мере распространения продольной волны через многослойный грунт испытывают определенное затухание. В настоящей работе произведена оценка величины данного затухания, а также силового воздействия на подвесной волоконно-оптический кабель. Действие механических вибраций приводит к появлению в волоконных световодах, составляющих основу ВОК, поляризационной модовой дисперсии, которая совместно с хроматической дисперсией значительно ограничивает дальность непосредственной связи и скорость передачи информации. Таким образом, механические вибрации, возникающие в теле земляного полотна и оказывающие воздействие на подвесной ВОК, могут привести к существенному ухудшению качества передаваемой информации в современных высокоскоростных волоконно-оптических системах передачи, что отрицательно скажется на пропускной и провозной способности линий железнодорожного транспорта и других факторах перевозочного процесса.

Ключевые слова: механические вибрации, волоконно-оптический кабель, поляризационная модовая дисперсия, уширение импульса, длина регенерационного участка, пропускная способность

Original article

IMPACT OF MECHANICAL VIBRATIONS FROM ROLLING STOCK ON SUSPENDED FIBER OPTIC CABLE

Savin Evgeny Z.

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia, ev.savin.49@mail.ru

Abstract. Fiber-optic cable (FOC), suspended on the supports of the contact network, is subject to the influence of many external factors, among which it is necessary to note the mechanical vibrations that occur when trains move on an imperfectly flat rail rolling surface. These vibrations are in the low frequency range, and as the longitudinal wave propagates through the multilayer soil, they experience a certain attenuation. In this work, the magnitude of this attenuation was estimated, as well as the power effect on the suspended fiber-optic cable. The action of mechanical vibrations leads to the appearance of polarization mode dispersion in fiber lightguides that form the basis of FOC, which, together with chromatic dispersion, significantly limit the direct communication range and information transfer rate. Thus, mechanical vibrations that occur in the roadbed body and affect the suspended FOC can lead to a significant deterioration in the quality of transmitted information in modern high-speed fiber-optic transmission systems, which will negatively affect the throughput and carrying capacity of railway transport lines and other factors of the transportation process.

Keywords. mechanical vibrations, fiber optic cable, polarization mode dispersion, pulse broadening, regeneration section length, bandwidth

Введение

В соответствии со стратегией развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г. одной из задач является организация движения тяжеловесных грузовых и пассажирских поездов с высокими скоростями на единой железнодорожной сети, позволяющей оптимизировать себестоимость перевозок [1].

Одним из направлений для решения поставленной задачи становится повышение осевых нагрузок подвижного состава до 30 т/ось. Повышение осевых нагрузок вызывает увеличение вибродинамического воздействия на железнодорожный путь,

источником которого является силовое воздействие подвижного состава, оказываемое им на железнодорожный путь при соответствующем движении. Причина его появления – перемещение поезда некоторой массы по не идеально ровной и прерывистой поверхности катания рельсов и наличие стыков. Возникающее возмущение распространяется за пределы пути и оказывает воздействие на объекты инфраструктуры. К последним относятся опоры контактной сети, на которых располагаются не только элементы контактной подвески, но и волоконно-оптический кабель (ВОК).

Под воздействием механических вибраций в оптических волокнах, которые составляют основу ВОК, происходит изменение основных параметров поляризованного излучения, а именно: эллиптичности и угла поворота большой оси эллипса поляризации. При этом угол поворота большой оси эллипса поляризации и эллиптичность излучения на выходе оптического волокна существенно зависят от частоты механических вибраций и соответствующего силового воздействия. Цель настоящей работы: определение степени воздействия механических вибраций при прохождении подвижного состава по железнодорожному пути на параметры оптических волокон, а следовательно, на качество и дальность связи.

Основная часть

Известно, что вибрации, возбуждаемые движущимся подвижным составом, имеют ярко выраженный низкочастотный характер [2]. При прохождении подвижного состава по рельсошпальной решетке возникают механические колебания, частота которых обусловлена расстоянием между осями шпал и скоростью движения поезда. Такая частота, Гц, рассчитывается по формуле [3]

$$\Omega = \frac{v_n}{3,6 L}, \quad (1)$$

где v_n – скорость движения поезда, м/с; L – расстояние между осями шпал, м.

Для звеньев пути характерна частота вибраций, образующихся из-за ударного воздействия колеса на стык рельсов. Такая частота вычисляется по формуле, аналогичной (1), только за L принимается расстояние между вагонными тележками.

В табл. 1 приведены результаты расчета по формуле (1) частоты механических вибраций в зависимости от скорости движения поезда. За основу взят четырехосный полувагон 12–132 с базой 8650 мм и расстоянием между осями шпал 500 мм.

Таким образом, целесообразно принять за основу спектр частот от 5 до 100 Гц, для которого необходимо рассчитать затухание продольной волны при распространении ее в теле земляного полотна.

Затухание вибрации в грунте, Дб, обусловлено следующими потерями

$$\alpha_{пр} = 20 \lg \left[\frac{1}{2} \left(1 + \frac{\rho_{ш} v_{ш}}{\rho_n v_n} \right) \right] + 20 \lg \left[\frac{1}{2} \left(1 + \frac{\rho_r v_r}{\rho_n v_n} \right) \right] + 20 \lg \left[\frac{1}{2} \left(1 + \frac{\rho_6 v_6}{\rho_r v_r} \right) \right]. \quad (3)$$

Значения параметров при распространении волны в соответствующих средах приведены в табл. 2 [2].

В табл. 3 представлены результаты расчетов на основных частотах по формуле (2), в табл. 4 – по формуле (3), а в табл. 5 – суммарная величина потерь.

$$\alpha = \alpha_n + \alpha_{пр},$$

где α_n – внутренние потери в грунте, Дб; $\alpha_{пр}$ – потери при прохождении волны через среды, обладающие различным волновым сопротивлением, Дб.

Таблица 1

Зависимость частоты механических вибраций от скорости поезда

Частота вибраций	Скорость поезда, км/ч									
	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
При наличии стыков, Гц	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,9	4,2	4,5	4,8
Неоднородность рельсового пути, Гц	33,3	38,9	44,4	50,0	55,6	61,1	66,7	72,2	77,8	83,3

Внутренние потери в грунте α_n вызывают затухание вибрации, Дб, по мере увеличения расстояния r [2]

$$\alpha_n = 4,34 \frac{\varpi k_n r}{v}, \quad (2)$$

где ϖ – угловая частота вибраций, Гц, $\varpi = 2 \pi \Omega$; k_n – коэффициент потерь в грунте; v – скорость распространения продольной волны в грунте, м/с.

Затухание в грунте, Дб, обусловленное потерями при прохождении продольной волны через среды, обладающие различным волновым сопротивлением, рассчитывается по формуле [2]

$$\alpha_{пр} = \sum_{i=1}^n 20 \lg \left[\frac{1}{2} \left(1 + \frac{\rho_{1i} v_{1i}}{\rho_{2i} v_{2i}} \right) \right],$$

где ρ – плотность грунта, г/см³; i – число переходов от одного слоя грунта к другому.

Пусть верхнее строение пути состоит из щебеночного балласта и песчаной подушки, которые располагаются на основной площадке из глины. Учитывая, что в железобетонной опоре коэффициент потерь в бетоне значительно меньше, чем в стали, то в металлической арматуре им можно пренебречь. Тогда затухание при прохождении продольной волны через многослойный грунт к опоре определится:

Таблица 2

Параметры волны и соответствующих сред

Среда	Скорость распространения продольной волны v , м/с	Коэффициент потерь k_n	Плотность грунта ρ , г/см ³
Щебень	3500	0,01	2,65
Песок	600	0,1	1,6
Глина	1500	0,2	1,7
Бетон	4470	0,015	2,43

Таблица 3

Расчет внутренних потерь в соответствующих средах

Внутренние потери, дБ	Частота, Гц										
	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\alpha_{пш}$	0,0001	0,0002	0,0005	0,0007	0,0009	0,0012	0,0014	0,0016	0,0019	0,0021	0,0023
$\alpha_{пп}$	0,0045	0,0091	0,0182	0,0273	0,0363	0,0454	0,0545	0,0636	0,0727	0,0818	0,0909
$\alpha_{пг}$	0,0603	0,1206	0,2413	0,3619	0,4826	0,6032	0,7239	0,8445	0,9652	1,0858	1,2065
$\alpha_{пб}$	0,0023	0,0046	0,0091	0,0137	0,0183	0,0229	0,0274	0,0320	0,0366	0,0412	0,0457
$\Sigma\alpha_{п}$	0,0673	0,1345	0,2691	0,4036	0,5382	0,6727	0,8072	0,9418	1,0763	1,2109	1,3454

Таблица 4

Расчет потерь при переходе волны через различные среды

$\alpha_{пш-п}$, дБ	$\alpha_{пп-г}$, дБ	$\alpha_{пг-б}$, дБ	$\Sigma\alpha$, дБ
14,5357	5,2401	8,3985	28,1744

Таблица 5

Суммарные потери в многослойном грунте и бетоне

Суммарные потери	Частота, Гц										
	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
α , дБ	28,24	28,31	28,44	28,58	28,71	28,85	28,98	29,12	29,25	29,39	29,52

Для определения силы, действующей на волоконно-оптический кабель, необходимо определиться с вертикальным напряжением на основной площадке в подрельсовой зоне. Данная задача является весьма сложной, так как величины возникающих вертикальных напряжений, проявляющихся при движении подвижного состава, зависят от чувствительности грунта к действию вибродинамической нагрузки, от деформативных характеристик грунтов земляного полотна, а также от влияния природных воздействий. То есть этот процесс носит стохастический характер. Поэтому целесообразно воспользоваться результатами экспериментальных исследований, которые приведены, в частности, в [4]. Так, для рассматриваемого диапазона скоростей вертикаль-

ное напряжение на основной площадке в подрельсовой зоне составляет $G = 30-35$ кПа.

Тогда сила F_0 , Н, действующая на ВОК с учетом суммарного затухания α , рассчитывается по формуле

$$F_0 = F \cdot 10^{-\frac{\alpha}{10}}, \quad (4)$$

где $F = GS$ – сила, действующая на шпалу, Н; S – площадь контакта, м².

Воспользовавшись формулой (4) и представленными данными, можно произвести расчет силового воздействия на ВОК для соответствующих частот (табл. 6).

Таблица 6

Силовое воздействие на подвесной волоконно-оптический кабель

Сила, действующая на ВОК	Соответствующие частоты, Гц										
	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
F_0 , Н	36,43	35,87	34,77	33,71	32,69	31,69	30,72	29,78	28,88	28,00	27,14

Результаты

При распространении света по волоконному световоду наблюдается эллиптическая поляризация. В результате воздействия механических вибраций в оптическом волокне происходит изменение параметров поляризации: эллиптичности и угла поворота большой оси эллипса [5].

В работе [6] получены формулы эллиптичности η и угла поворота большой оси эллипса θ при воздействии механических вибраций, которые имеют следующий вид:

$$\operatorname{tg} 2\theta = \frac{\psi \sin(2g_e \psi k_0 \ell)}{\cos(2g_e \psi k_0 \ell) + \left(\frac{\Delta n}{2g_e}\right)^2}; \quad (5)$$

$$\sin 2\eta = \frac{\Delta n \sin^2(g_e \psi k_0 \ell)}{g_e \psi^2}; \quad (6)$$

где g_e – фактор гиротропии, $g_e = \frac{4\pi Ne^2}{m^2\beta} \times$

$$\times \frac{\omega F_0 \cos \Omega t}{\left(\omega_0^2 - \omega^2\right)^2 - \omega^2 \left(\frac{F_0}{m\beta} \cos \Omega t\right)^2}; N$$

– число невзаимодействующих гармонических осцилляторов, в роли которых выступают атомы (молекулы) среды; e – элементарный заряд электрона; m – масса покоя электрона; ω_0 – круговая частота собственных колебаний; ω – круговая частота колебаний электронов, вызванных воздействием механических вибраций; F_0 – постоянно действующая сила; β – коэффициент, учитывающий реакцию среды на механические вибрации; Ω – частота механических вибраций; Δn – разность показателей преломления сердцевинки волокна для ортогональных составляющих поляризованного

излучения; $\psi = \sqrt{1 + \frac{\Delta n^2}{4g_e^2}}$ – параметр, характеризующий изменение состояния поляризации при воздействии на волоконный световод механических вибраций; k_0 – волновой коэффициент идеальной среды; ℓ – длина волоконного световода.

В этих формулах наиболее значительными факторами, влияющими на изменение параметров поляризованного излучения, являются рассмотренные ранее силовое воздействие F_0 и частота Ω механических вибраций. Поэтому целесообразно выполнить исследование параметров поляризованного излучения при воздействии именно этих двух факторов.

По формулам (5) и (6) выполнен расчет параметров поляризованного излучения, результаты которого представлены графиками (рис. 1 и 2).

Изменение эллиптичности и угла поворота большой оси эллипса свидетельствуют о проявлении поляризационной модовой дисперсии, приводящей к уширению импульсов.

В работе [5] представлена формула определения уширения импульсов, с/км, в зависимости от изменения эллиптичности поляризованного излучения, которая имеет следующий вид:

$$\tau_{эл} = \frac{\lambda \arccos(\eta_0) \left(\frac{1}{1-\eta} \right)}{2\pi c}, \quad (7)$$

где η_0 – начальная эллиптичность (под начальной эллиптичностью понимают эллиптичность на выходе волоконного световода при отсутствии меха-

нических вибраций); λ – длина волны поляризованного излучения.

Уширение импульсов, с/км, за счет изменения угла поворота большой оси эллипса рассчитывается по формуле [7]

$$\tau_{уп} = \frac{\theta \lambda}{\pi c}. \quad (8)$$

Тогда уширение импульсов за счет суммарного проявления эллиптичности и угла поворота большой оси эллипса при воздействии механических вибраций определится

$$\tau_{PMD} = \sqrt{\tau_{эл}^2 + \tau_{уп}^2}. \quad (9)$$

Воспользовавшись формулами (7)–(9), можно рассчитать уширение импульсов за счет изменения эллиптичности и угла поворота большой оси эллипса, а также суммарного уширения импульсов в зависимости от частоты механических вибраций (табл. 7).

Таким образом, максимальное уширение импульсов наблюдается на частоте 30 Гц, что соответствует скорости подвижного состава порядка 60 км/ч при наличии неоднородностей рельсового пути. Именно эту наихудшую ситуацию, когда $\tau_{PMD} = 4,58$ пс/км, необходимо принять за основу при выполнении последующих исследований.

Для одномодовых волоконных световодов, например, со смещенной ненулевой дисперсией (*NZDSF*), в первую очередь, необходимо учитывать хроматическую дисперсию, удельный коэффициент которой $D(\lambda)$ в соответствии с рекомендациями МСЭ-T для волокна типа *G.655* на длине волны $\lambda = 1,55$ мкм составляет 1–10 пс/нм·км [8].

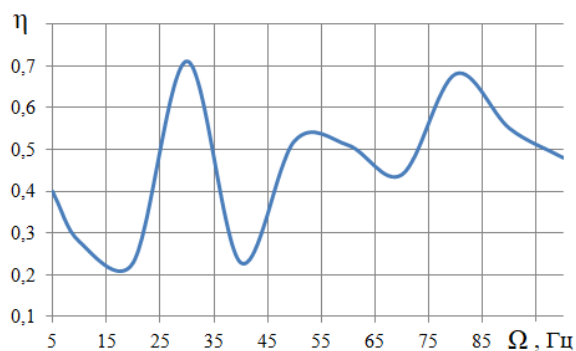


Рис. 1. Зависимость эллиптичности от частоты вибраций

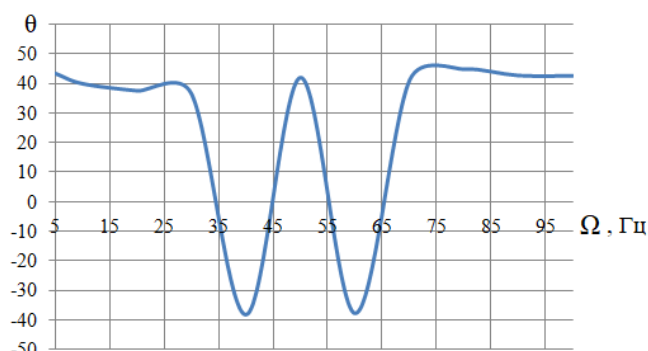


Рис. 2. Зависимость угла поворота большой оси эллипса от частоты вибраций

Таблица 7

Уширение импульсов при воздействии механических вибраций

Параметр	Частота механических вибраций Ω , Гц										
	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\tau_{эл}$, пс/км	2,15	1,79	1,68	4,46	1,68	2,69	2,64	2,31	4,04	2,87	2,49
$\tau_{уп}$, пс/км	1,25	1,15	1,08	1,04	1,10	1,21	1,09	1,18	1,29	1,23	1,22
τ_{PMD} , пс/км	2,49	2,13	1,99	4,58	2,01	2,95	2,85	2,59	4,24	3,12	2,77

ВОЗДЕЙСТВИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ВИБРАЦИЙ ОТ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ПОДВЕСНОЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ КАБЕЛЬ

Уширение импульсов за счет хроматической дисперсии рассчитывается по формуле

$$\tau_{xp} = \Delta\lambda D(\lambda),$$

где $\Delta\lambda$ – ширина спектра источника излучения. Пусть $\Delta\lambda = 1$ нм.

Тогда уширение импульсов за счет действия механических вибраций с учетом хроматической дисперсии определится

$$\tau_{\Sigma} = \sqrt{\tau_{PMD}^2 + \tau_{xp}^2}.$$

В табл. 8 представлены результаты расчета суммарного уширения импульсов за счет хроматической дисперсии и воздействия механических вибраций.

Уширение импульсов вследствие дисперсионных явлений ограничивает длину регенерационного участка, км, которая рассчитывается по формуле [9]

$$l_p = \frac{0,25 \cdot 10^6}{B \tau_{\Sigma}},$$

где B – скорость передачи информации, Мбит/с.

В табл. 9 приведены расчетные значения длины регенерационного участка для различных уровней синхронной цифровой иерархии при соответствующих значениях суммарного уширения импульсов.

Очевидно, что для аппаратуры, работающей на скорости свыше 622 Мбит/с, длина регенерационного участка из-за проявления хроматической дисперсии и воздействия механических вибраций становится настолько незначительной, что применять данную аппаратуру для передачи цифровой информации является нецелесообразным.

В табл. 10 приведены данные расчета пропускной способности волоконного световода при совместном воздействии механических вибраций с учетом хроматической дисперсии.

Таким образом, поляризационная модовая дисперсия в совокупности с хроматической дисперсией существенно ограничивает пропускную способность оптических волокон.

Таблица 8

Суммарное уширение импульсов ($\tau_{PMD} = 4,58$ пс/км)

Суммарное уширение импульсов	Соответствующие значения хроматической дисперсии, пс/км									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
τ_{Σ} , пс/км	4,68	4,99	5,47	6,08	6,78	7,55	8,36	9,22	10,10	11,00

Таблица 9

Длина регенерационного участка, км, при совместном воздействии механических вибраций с учетом хроматической дисперсии

Аппаратура SDH	Значения суммарного уширения импульсов τ_{Σ} , пс/км									
	4,68	4,99	5,47	6,08	6,78	7,55	8,36	9,22	10,10	11,00
STM-1	344	323	295	265	238	214	193	175	160	147
STM-4	85	80	73	66	59	53	48	43	40	36
STM-16	21	20	18	16	15	13	12	11	10	9
STM-64	5	5	5	4	4	3	3	3	2	2

Таблица 10

Пропускная способность волоконного световода, Мбит/с, при совместном воздействии механических вибраций с учетом хроматической дисперсии

τ_{Σ} , пс/км	Длина регенерационного участка, км									
	50	60	70	80	90	100	110	120	130	
4,68	1067	889	762	667	593	534	485	445	410	
4,99	1001	834	715	626	556	501	455	417	385	
5,47	914	761	653	571	508	457	415	381	351	
6,08	823	685	588	514	457	411	374	343	316	
6,78	738	615	527	461	410	369	335	307	284	
7,55	663	552	473	414	368	331	301	276	255	
8,36	598	498	427	374	332	299	272	249	230	
9,22	542	452	387	339	301	271	247	226	209	
10,10	495	413	354	309	275	248	225	206	190	
11,00	455	379	325	284	253	227	207	189	175	

Примечание – темным фоном выделена область, для которой использование аппаратуры SDH является нецелесообразным.

Выводы

1. Установлено, что наибольшее воздействие механических вибраций на подвесной волоконно-оптический кабель происходит в диапазоне частот 5–100 Гц. Максимальное воздействие зафиксировано на частоте 30 Гц, при котором уширение импульсов в одномодовом волоконном световоде составляет 4,58 пс/км, что является соизмеримым с уширением импульсов за счет хроматической дисперсии. Такая ситуация возникает из-за движения грузовых поездов по не идеально ровной и прерывистой поверхности катания рельсов со скоростью порядка 60 км/ч.

2. Силовое воздействие на волоконно-оптический кабель уменьшается с ростом частоты механических вибраций, так как возрастает затухание продольной волны при ее распространении в многослойном грунте и материале железобетонной опоры, и находится в пределах 27,14–36,43 Н.

3. Механические вибрации существенно ограничивают дальность непосредственной связи и

пропускную способность (скорость передачи информации) волоконных световодов. Установлено, что при воздействии механических вибраций с учетом хроматической дисперсии использование волоконно-оптических систем передачи, начиная с уровня STM-64, является нецелесообразным.

Таким образом, воздействие механических вибраций на подвесной волоконно-оптический кабель может привести к существенному ухудшению качества передаваемой информации в современных высокоскоростных волоконно-оптических системах передачи, а следовательно, отрицательно скажется на своевременном получении информации в ОАО «РЖД», управлении всей инфраструктурой железнодорожного транспорта, что способствует снижению пропускной и провозной способности железнодорожных линий.

Кроме того, механические вибрации являются причиной снижения достоверности передачи информации, что становится недопустимым с точки зрения безопасности движения поездов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г. URL : http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=7048layer_id=51048id=3997 (дата обращения: 12.06.2025).
2. Бондаренко В.А., Фролова Д.С., Щерба Е.М. Моделирование вибрационного воздействия при движении транспортных машин в условиях промышленных предприятий // *Наукоедение*. 2017. Т. 9, № 5. URL : <https://naukovedenie.ru/PDF/87TVN517.pdf> (дата обращения: 12.06.2025).
3. Конон А.А. Определение собственных частот колебаний элементов железнодорожного пути под поездной нагрузкой и выбор упругих амортизаторов // *Бюллетень результатов научных исследований*. 2021. Вып. 4. С. 57–64.
4. Колос А.Ф., Сидоренко А.А., Соловьев С.В. Особенности напряженного состояния грунтов подплитного основания при безбалластной конструкции верхнего строения пути // *Инженерный вестник Дона*. 2012. № 3. С. 43–56.
5. Савин Е.З., Шевцов А.Н. Совместное воздействие внешних факторов на подвесной волоконно-оптический кабель // *Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона*. 2023. № 4(37). С. 94–100.
6. Войкусов Т.С., Савин Е.З. Воздействие механических вибраций на поляризационные явления в оптических волокнах // *Известия РАН*. 2006. Т. 70, № 9. С. 1306–1309. (Серия физическая).
7. Савин, Е.З. Воздействие механических вибраций на качество передаваемой информации по волоконному световоду // *Развитие инфраструктуры транспорта и технологии перевозочного процесса в современных условиях : труды международной науч.-практ. конф., Хабаровск, 17–19 января 2007 г. ; под ред. В.А. Телегиной. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2007. С. 167–171.*
8. МСЭ-Т. Рекомендации МСЭ-Т G-655. Системы и среда передачи, цифровые системы и сети. Характеристики среды передачи и оптических систем – волоконно-оптические кабели. Характеристики одномодового оптического волокна с ненулевой смещенной дисперсией: сектор стандартизации электросвязи МСЭ: 2009-11. Женева, 2017. 26 с.
9. Савин Е.З. Волоконно-оптические кабели и пассивные компоненты ВОЛП : учебное пособие. Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2012. 223 с.

REFERENCES

1. Sstrategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossjskoj Federatsii do 2030 goda [Strategy for the Development of Railway Transport in the Russian Federation until 2030]. URL : http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=7048layer_id=51048id=3997 (data obrashcheniya: 12.06.2025).
2. Bondarenko V.A., Frolova D.S., Shcherba E.M. Modelirovanie vibratsionogo vozdejstviya pri dvizhenii transportnykh mashin v usloviyakh promyshlennykh predpriyatij [Simulation of vibration impact by transport vehicles moving in conditions of industrial enterprises] // *Naukovedeniye*. 2017. T. 9, № 5. URL : <https://naukovedenie.ru/PDF/87TVN517.pdf> (data obrashcheniya: 12.06.2025)
3. Konon A.A. Opredelenie sobstvennykh chastot kolebanij elementov zheleznodorozhnogo puti pod poezdnoj nagruzkoj i vybor uprugikh amortizatorov [Determination of natural frequencies of oscillations of railway track elements under train load and selection of elastic shock absorbers] *Byulleten' resul'tatov nauchnykh issledovaniy*. 2021. Vyp. 4. S. 57–64.
4. Kolos A.F., Sidorenko A.A., Soloviev S.V. Osobennosti napryazhyonnogo sostoyaniya gruntov podplitnogo osnovaniya pri bezballastnoj konstruksii verkhnego stroyeniya puti [Features of stressed state of subsurface foundation soils under ballast-free track topsides] // *Inzhenerny vestnik Dona*. 2012, № 3. S. 43–56.

ВОЗДЕЙСТВИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ВИБРАЦИЙ ОТ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ПОДВЕСНОЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ КАБЕЛЬ

5. Savin E.Z., Shevtsov A.N. Sovmestnoe vozdejstvie vneshnikh faktorov na podvesnoj volokonno-opticheskiy kabel' [Joint influence of external factors on the suspended fiber-optic cable] // Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo Regiona. 2023. № 4(37). S. 94–100.
6. Voykusov T.S., Savin E.Z. Vozdejstvie mekhanicheskikh vibratsij na polyarizatsionnye yavleniya v opticheskikh voloknakh [Effects of mechanical vibrations on polarization phenomena in optical fibers] // Izvestiya RAN. 2006. T. 70, № 9. S. 1306–1309. (Seriya fizicheskaya).
7. Savin E.Z. Vozdejstvie mekhanicheskikh vibratsij na kachestvo peredavayemoj informatsii po volokonnomu svetovodu [Impact of mechanical vibrations on the quality of transmitted information over a fiber light conductor] // Razvitie infrastruktury transporta i tekhnologii perevoznogo protsessa v sovremennykh usloviyakh : trudy mezhdunarodnoj nauch.-prakt. konf., Khabarovsk, 17–19 yanvarya 2007 g. : pod red. V.A. Teleginoy. Khabarovsk : Izd-vo DVGUPS, 2007. S. 167–171.
8. MSE-T. Rekomendatsii MSE-T G-655. Sistemy i sreda peredachi, tsifrovye sistemy i seti. Kharakteristiki sredy peredachi i opticheskikh system – volokonno-opticheskie kabeli. Kharakteristiki odnomodovogo opticheskogo volokna s nenulevoj smeshchyonnoy dispersiej [ITU-T Recommendation G.655. Transmission systems and medium, digital systems and networks. Characteristics of transmission medium and optical systems – fiber optics cables. Characteristics of single-mode optical fiber and cable with non-zero dispersion bias] : sektor standartizatsii elektrosvyazi MSE. 2009-11. Zheneva, 2017. 26 s.
9. Savin E.Z. Volokonno-opticheskie kabeli i passivnye komponenty VOLP [Fiber-optic cables and passive components of FOTL] : uchebnoe posobie : Uchebno-metodicheskij tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte. 2012. 223 s.

Информация об авторе

Е.З. Савин – профессор, кандидат технических наук, профессор кафедры «Автоматика, телемеханика и связь».

Information about the author

E.Z. Savin – Professor, Candidate of Science (Engineering), Professor of the Department of Automatics, Telemechanics and Communication.

Статья поступила в редакцию 23.09.2025; одобрена после рецензирования 31.10.2025; принята к публикации 31.10.2025.
The article was submitted: 23.09.2025; approved after reviewing: 31.10.2025; accepted for publication: 31.10.2025.

Научная статья
УДК 625.14, 004.89, 699.842
doi:10.31079/2415-8658-2025-4-98-106

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ВИБРАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕСАДОЧНЫЙ УЗЕЛ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА

Степанов Константин Дмитриевич¹, Дружинина Ольга Валентиновна²

^{1,2} Российский университет транспорта, Москва, Россия

² Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, Москва, Россия

¹ sksteps@mail.ru

² ovdruzh@mail.ru

Аннотация. Развивается подход к комплексной оценке вибрационного воздействия железнодорожного транспорта на конструкции транспортно-пересадочного узла (ТПУ). Актуальность темы обусловлена необходимостью разработки наукоемких и энергоэффективных методов обработки данных и оценки технического состояния элементов транспортной инфраструктуры. Рассмотрены вопросы моделирования и оценки вибрационных воздействий транспорта на объекты транспортной инфраструктуры в рамках разработки интеллектуальной системы поддержки принятия решений (СППР). Для построения модулей интеллектуальной СППР использованы методы имитационного моделирования, теории графов, методы управления на основе нечеткой логики, технологии машинного обучения и современные программные решения. Разработана графовая модель распространения вибраций применительно к ТПУ. Предлагается структура СППР, содержащая модуль построения модели, модуль нечеткой логики и модуль предиктивной аналитики. Реализация указанных модулей позволяет анализировать динамику вибрационных процессов, выявлять потенциальные зоны риска и формировать рекомендации по применению виброизоляционных мер. Результаты могут быть использованы для решения задач моделирования, оценки и прогнозирования вибрационных воздействий на элементы транспортной инфраструктуры, а также задач разработки интеллектуальных систем управления в транспортной отрасли.

Ключевые слова: вибрационное воздействие, транспортно-пересадочный узел, железнодорожные пути, система поддержки принятия решений, интеллектуальные транспортные системы, нечеткие правила, машинное обучение

Original article

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF VIBRATIONAL IMPACT ON A TRANSPORT AND TRANSFER HUB USING INTELLIGENT ANALYSIS METHODS

Stepanov Konstantin D.¹, Druzhinina Olga V.²

^{1,2} Russian University of Transport, Moscow, Russia

² Federal Research Center «Informatics and Control» of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹ sksteps@mail.ru

² ovdruzh@mail.ru

Abstract. The article develops an approach to a comprehensive assessment of the vibration impact of railway transport on the structures of a transport and transfer hub (TTH). The relevance of the topic is due to the need to develop high-tech and energy-efficient methods of data processing and assessment of the technical condition of transport infrastructure elements. The problems of modeling and evaluating the vibration effects of transport on transport infrastructure facilities within the framework of the development of an intelligent decision support system (DSS) are considered. Simulation modeling methods, graph theory, control methods based on fuzzy logic, machine learning technologies and modern software solutions are used to construct intelligent DSS modules. A graph model of vibration propagation applied to TTH is developed. The DSS structure is proposed which contains a model construction module, a fuzzy logic module and a predictive analytics module. The implementation of these modules makes it possible to analyze the dynamics of vibration processes, identify potential risk areas and form recommendations for the use of vibration isolation measures. The results can be used to solve problems of modeling, evaluating and predicting vibration impacts on elements of transport infrastructure, as well as problems of developing intelligent control systems in the transport industry.

Keywords: vibration effects, transport and transfer hub, railway tracks, decision-making support systems, intelligent transportation systems, fuzzy rules, machine learning

Развитие железнодорожных путей в мегаполисах сопровождается активным строительством новых транспортно-пересадочных узлов (ТПУ), обеспечивающих интеграцию различных видов транспорта и перераспределение пассажиропотоков [1, 2]. Возведение и эксплуатация подобных объектов неизбежно связаны с повышенными динамическими нагрузками, возникающими при движении транспорта, распространяющимися через рельсошпальную решетку и основание воздействующими на несущие конструкции ТПУ и подземные сооружения метрополитена.

Источник вибрации формируется при движении подвижного состава по железнодорожным путям. Динамические нагрузки передаются на шпалы, балласт и далее в грунтовой массив, создавая зоны колебаний различной интенсивности [3]. Важно учитывать воздействие вибрации на здание ТПУ в целом и на объекты, входящие в совокупность строительных конструкций транспортно-пересадочного узла: пассажирские залы, платформы, перекрытия, фундаментные плиты.

Проблемы, связанные с оценкой и прогнозированием вибрационных воздействий транспортных средств, с помощью известных классических методов и их обобщений и модификаций изучались в [4–7] и др. В [4] предложена методика измерений уровней вибрации при прохождении рельсового транспорта с учетом кратковременности и регулярной повторяемости в течение суток. Прогнозируемые уровни вибрации определяются либо с помощью измерений при обследовании участка строительства зданий, либо с помощью анализа данных, полученных на существующих аналогах. В [5] рассмотрены особенности методов прогнозирования и предложен инновационный подход к прогнозированию вибрации для проектируемых железнодорожных линий на основе метода экспериментального определения вибрационной характеристики поезда. В [6] с помощью численного метода проанализировано вибрационное воздействие метрополитена на проектируемый многоэтажный жилой дом, выполнена оценка влияния наличия виброизоляционного слоя на этот процесс, а также получены значения виброускорений на перекрытиях для прогноза уровней вибрации и звука в расчетных точках в помещениях с нормируемыми уровнями. В [7] рассмотрена математическая модель воздействия вибрации на несущие конструкции здания в непосредственной близости от действующей линии метрополитена. Построение уравнений модели предлагается провести с учетом описания взаимодействия грунта, через который передается вибрация от подвижного состава в тоннеле метрополитена, и элементов несущей конструкции здания при наличии вязкоупругого элемента Кельвина–Фойгхта.

Наряду с оценкой вибрационных воздействий с применением известных методов, в условиях интенсивного строительства и усиленной эксплуатации объектов городской инфраструктуры возникает необходимость получения и совершенствования новых способов оценки вибрационных воздействий, в том числе с применением интеллектуальных технологий, связанных с разработкой экспертных систем [8, 9], а также с применением моделей интеллектуального управления [10].

В современных системах поддержки принятия решений (СППР) для управления сложными техническими объектами все чаще используются методы и технологии искусственного интеллекта [11]. Это особенно актуально для транспортной отрасли, где эффективность СППР связана с реализацией возможностей обеспечения безопасности и надежности эксплуатации и с активной разработкой интеллектуальных транспортных систем [12]. Для разработки интеллектуальных СППР эффективность продемонстрировали методы нечеткого управления, искусственные нейронные сети и технологии машинного обучения [13–15]. В задачах комплексной оценки состояния объектов, параметры которых постоянно изменяются и требуют непрерывного мониторинга, инструменты искусственного интеллекта позволяют выявлять скрытые зависимости и получать результаты прогнозов с учетом математической верификации разработанных интеллектуальных моделей и оценки рисков использования аппарата искусственного интеллекта в задачах принятия решений [16].

Цель настоящей работы – развитие комплексного подхода к оценке вибрационного воздействия железнодорожного транспорта на объекты транспортной инфраструктуры. В качестве основных задач рассмотрены такие, как разработка модулей интеллектуальной СППР для оценки вибрационного воздействия железнодорожного транспорта на конструкции транспортно-пересадочного узла (ТПУ); описание и применение разработанных моделей и алгоритмов в рамках авторского программного комплекса VibCalc [17, 18] применительно к ТПУ; оценка возможностей разработанного алгоритмического обеспечения на примере построения тепловой карты изменения виброускорений. Проводится сравнение использования оценки вибрационных воздействий на основе традиционного численного метода расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) и на основе применения интеллектуальных методов.

Далее учитывается структура транспортного комплекса, в состав которого включаются элементы инфраструктуры ТПУ. А именно, предполагается, что в подземной части пролегают действующие тоннели метрополитена, над ними располагается здание ТПУ с наземными железнодорожными путями. На рис. 1 (<https://www.mskagency.ru/photobank/7045717>) приведен пример строящегося ТПУ. Такая конфигурация характерна для крупных городов и обусловлена

необходимостью интеграции различных видов транспорта в едином пространстве. Вибрации, возникающие при движении подвижного состава [3], распространяются от источника через промежуточные среды и конструктивные элементы, достигая как наземных частей ТПУ, так и подземных тоннелей.

Комплексный методологический подход к оценке вибрационного воздействия может включать сочетание традиционных инженерных расчетов НДС конструкций с применением интеллектуальных СППР. Традиционный подход базируется на нормативных расчетах по определению предельных смещений и коэффициентов запаса прочности несущих элементов. Такой метод позволяет оценить безопасность эксплуатации, но часто ограничен статичностью и не учитывает динамику изменения параметров во времени. Компьютерное моделирование сложных объектов с учетом множества факторов нагрузки осуществляется с применением численных методов, важнейшим из которых является метод конечных элементов.

Для построения расчетных моделей вибрационного воздействия на примере ТПУ как с помощью расчета НДС, так и с помощью комплекса VibCalc использовались аналогичные входные параметры, характеризующие физические, конструктивные и динамические свойства системы. Диапазон частот возбуждения составил 8–12 Гц, поскольку он характерен для колебаний, возникающих при движении пассажирских составов метрополитена. Амплитуда виброускорений принималась до 0,09 g для конструкций ТПУ и до 0,042 g – для тоннелей метрополитена, что соответствует значениям, полученным при измерениях. Осевая нагрузка на рельсы составила 210–230 кН, что соответствует

статическим нагрузкам от подвижного состава. Глубина заложения тоннелей метрополитена принята равной 10 м при диаметре тубинговой обделки 5,6 м, а расстояние от подошвы фундаментной плиты здания ТПУ до свода тоннеля варьировалось в пределах 6–10 м. Для расчета взаимодействия конструкций с основанием использованы модули деформации грунтов 20–35 мПа, соответствующие пескам средней крупности [19, 20]. Коэффициент демпфирования среды принят в пределах 0,05–0,08, что отражает среднюю степень затухания вибраций в грунтах различной плотности. Толщина фундаментной плиты здания ТПУ узла составила 1,0 м.

В анализе НДС указанные параметры используются для расчета деформаций, осадок и напряжений в конструкциях ТПУ и тоннелей с целью определения предельных состояний. В комплексе VibCalc указанные данные используются для исследования графовой модели распространения вибраций. Частоты и амплитуды колебаний задаются как характеристики узла «Источник вибрации» с учетом дальнейшего определения интенсивностей воздействия на конструктивные элементы. Модули деформации грунта и коэффициенты демпфирования использовались как параметры ребер графа, описывающих процессы передачи, отражения и затухания колебаний между узлами системы. Расстояния между элементами ТПУ рассматриваются как коэффициенты, определяющие скорость и степень ослабления вибрационных волн при их распространении. Значения виброускорений вводятся в качестве обучающих и контрольных данных для встроенного нейросетевого блока, в котором прогнозируются изменения вибрационного состояния и оценивается динамика воздействия на различные конструктивные элементы в процессе эксплуатации [21, 22].



Рис. 1. Пример строительства транспортно-пересадочного узла (ТПУ) в г. Москве

Построение и анализ расчетной модели на основе численной реализации метода конечных элементов позволяют проследить изменения напряженно-деформируемого состояния (НДС) грунтового массива и конструкций сооружений на каждой стадии строительства. Схема (рис. 2) представляет расположение элементов расчетной модели, построенной для анализа распределения напряжений и деформаций в массиве и конструкциях.

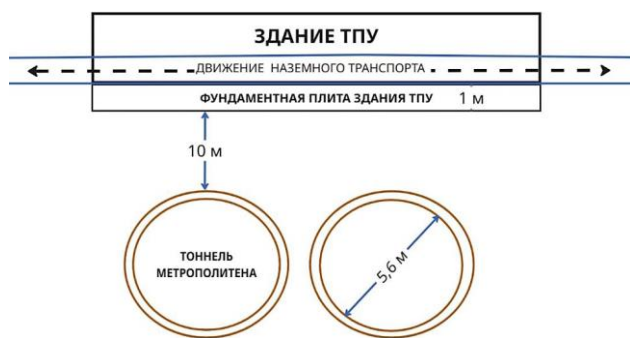


Рис. 2. Схематическое расположение объектов взаимодействия

Проведенные применительно к рассматриваемому примеру расчеты показали, что максимальные смещения элементов ТПУ при статических нагрузках от подвижного состава не превышают 5–8 мм. При моделировании интенсивного движения поездов имеет место возрастание до 10–12 мм. Для тоннелей получены значения осадок до 6–7 мм, что находится в пределах допустимых значений по нормативным документам. Характер деформаций для здания ТПУ определяется в основном осадками фундаментной плиты и прогибами перекрытий, а для тоннелей метро – локальными смещениями обделки. В обоих случаях уровень воздействия не приводит к потере устойчивости конструкций, но требует регулярного мониторинга.

В разработанном программном комплексе VibCalc реализуется ряд возможностей интеллектуальной СППР, обеспечивающей не только расчетно-аналитическую оценку, но и формирование прогнозных сценариев, необходимых для обоснования проектных решений и выбора оптимальных мер по виброизоляции источника колебаний. Посредством комплекса VibCalc выполняется построение графовой модели распространения колебаний с учетом поглощения, отражения и резонансных эффектов в конструкциях и грунте. Также Vibcalc позволяет прогнозировать временные ряды с использованием нейросетевого модуля предиктивной аналитики на основе разработанной архитектуры LSTM-сети, позволяющей моделировать динамику вибрационных процессов во времени и оценивать долгосрочные последствия при изменении эксплуатационных условий [21].

Перечень возможностей VibCalc включает в себя, в частности, имитационное моделирование вибрационных воздействий; нечеткий вывод с использованием экспертной базы правил; визуализацию; реализацию диагностического компонента. При построении графовой модели взаимодействий программа создает граф, где узлы представляют элементы инфраструктуры, а ребра описывают их взаимодействия (например, передача или поглощение вибраций). На основе заданных правил формируется матрица связности, задающая характеристики связей. В рамках имитационного моделирования вибрационных воздействий алгоритмы рассчитывают параметры вибраций для каждого узла графа, включая частоту и амплитуду. Расчеты производятся для заданного временного диапазона, что позволяет анализировать динамику вибрационных нагрузок.

Программный комплекс интерпретирует данные о вибрациях с применением правил нечеткой логики. Заключение формулируется с помощью качественной шкалы вибронегруженности сооружения (плохое, угрожаемое и хорошее состояние). В каждом узле реализуются две системы нечеткого вывода для оценки изменения таких параметров, как виброускорение и вибронегруженность сооружения соответственно. Построение базы нечетких правил для оценки вибрационного воздействия транспорта содержится в [23]. С учетом возможностей визуализации осуществляется интерактивное построение графа взаимодействий, а также графиков виброускорений для каждого узла в зависимости от времени и частоты. Функционирование диагностического компонента приводит к получению автоматизированного заключения о степени вибрационного воздействия на объект и при необходимости – к получению рекомендаций об улучшении виброизоляции.

Принцип работы моделирующего блока Vibcalc основан на применении представления объекта инфраструктуры в виде взвешенного ориентированного графа с узлами, обозначающими ключевые точки в пространстве, в которых предполагается проведение инструментальных измерений виброускорения конструкций. Каждый из узлов имеет набор характеристик и оператор эволюции. Типы узлов представлены на рис. 3.



Рис. 3. Диаграмма иерархии узлов, представленных в VibCalc

Возможные взаимодействия между узлами определяются взвешенными направленными ребрами, устанавливающими направление и время распространения вибрационной энергии. Соответственно, источник может иметь только исходящие ребра, тогда как адсорбер как входящие, так и исходящие. При этом адсорбер имеет три подтипа:

- переизлучатель (поглотитель), имеющий входящие ребра от одних узлов и исходящие ребра к другим узлам (с сохранением направления распространения вибрации);

- отражатель, имеющий входящие и исходящие ребра в любых направлениях кроме источника, с учетом изменения фазы вибрации при отражении;

- терминатор, имеющий только входящие ребра.

Вес каждого ребра определяется временем прохождения звука между узлами, что зависит от физического расстояния и типа среды распространения. Согласно тому, что изменение состояния каждого узла определяется оператором эволюции, имеет место равенство

$$S(t) = F(S(t_{i-1}), S_1(t_{i-1}), S_2(t_{i-1}), \dots, S_n(t_{i-1})),$$

где S – состояние узла в момент дискретного времени t ; S_1, S_2, \dots, S_n – множество состояний взаимодействующих узлов; F – оператор эволюции. Построение оператора эволюции в математической или алгоритмической форме является одной из важных задач моделирования, которая может быть решена с использованием информации, получаемой при обследовании инфраструктурного объекта.

Модуль нечеткой логики позволяет осуществлять содержательное конструирование оператора эволюции на основе слабо формализованного описания структуры узлов. Такой подход предполагает минимизацию инструментальных измерений при экспертном обследовании интересующего объекта инфраструктуры, однако, оставляет возможность для последующего уточнения модели путем подбора функций принадлежности. Классификация вибрационного воздействия для формирования базы нечетких правил осуществляется на основе результатов анализа данных и нормативной документации, при этом учитываются вибрации по уровню, частоте и типу воздействия [23]. Кроме того, наряду с определением влияния вибрации, необходимо получить данные об объекте влияния, а именно: классифицировать здания как объекты влияния

в зависимости от материала конструкции, формы здания, возраста и расположения относительно источника вибрации. В [23] проанализированы сочетания значений параметров для анализа вибрационного воздействия и приведены примеры правил логического вывода для комплексной оценки вибрационного воздействия в системе «источник–объект». Для создания нечеткой модели использованы алгоритмы Мамдани и Сугено.

В рамках решения задачи, направленной на оценку вибрационного воздействия на ТПУ, рассматривается граф, описывающий основные узлы ТПУ – излучатель вибрации (железнодорожные пути метрополитена), адсорбер-переизлучатель (фундамент здания ТПУ) и терминатор (здание ТПУ) (рис. 4). Предполагается, что применительно к рассматриваемой схеме здание ТПУ имеет низкую этажность, сложные архитектурные решения отсутствуют.

Указанная схема оперирует минимальным количеством узлов, представляющим интерес для моделирования, и может быть использована для сравнения с более комплексными схемами, предусматривающими наличие нескольких адсорберов-отражателей и узлов с резонансными характеристиками (например, учет платформ, пролетов, этажей высотного здания ТПУ).

С помощью модулей программного комплекса VibCalc проведено компьютерное моделирование с целью получения вибрационных характеристик, относящихся к узлам графовой модели. На рис. 5 представлен график виброускорения для адсорбера-переизлучателя (фундамент здания). Цветовым кодированием обозначены оценочное состояние (в баллах, от 1 до 3, 3 – наилучшее состояние, 1 – наихудшее состояние). Для моделирования рассматривается отрезок от 0 до 150 мс, через y обозначены виброускорения в дБ.

Характер изменения виброускорения свидетельствует о линейном возрастании виброускорения на начальном этапе моделирования и дальнейшем выходе на стационарный режим. Визуализация стационарного состояния соответствует колебательному процессу, связанному с дискретностью времени в системе.

Оператор эволюции, задаваемый с помощью нечеткой системы, задает «смещение» характеристик при взаимодействии узлов. В частности, рассмотрен пример, иллюстрирующий изменение виброускорения для адсорбера-переизлучателя (рис. 6).



Рис. 4. Простейшая графовая структура вибрационного воздействия для ТПУ

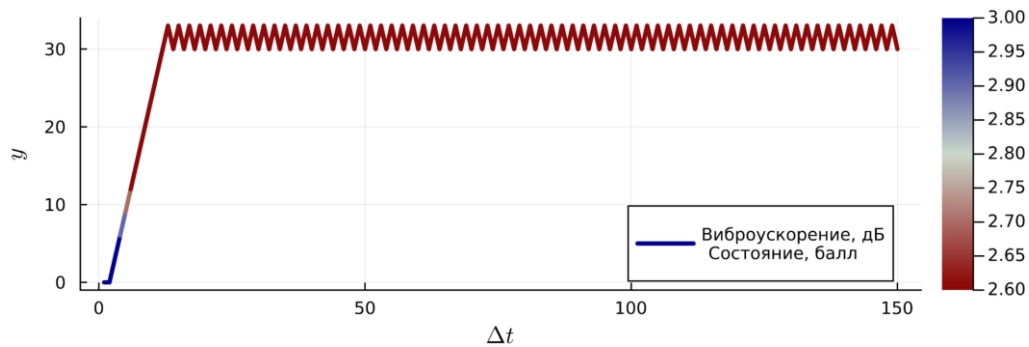


Рис. 5. График виброускорения для адсорбера-переизлучателя

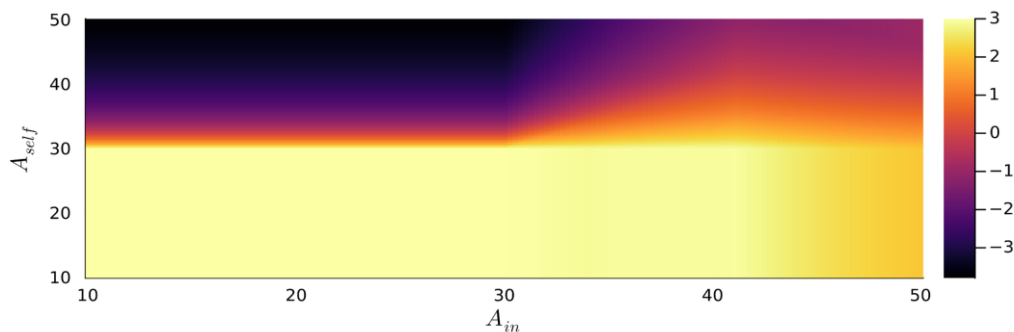


Рис. 6. Тепловая карта изменения виброускорения при взаимодействии узлов

Согласно рис. 6, по оси абсцисс задается входное виброускорение источника, дБ, по оси ординат задано собственное виброускорение адсорбера (фундамента), дБ. Цветовым кодированием представлен прирост виброускорения для одного шага моделирования (в диапазоне от -3 до 3). Следует отметить возникновение «насыщения» у адсорбера, связанное с его упругими характеристиками. Приведенная тепловая карта соответствует штатной вибронагрузке на здание ТПУ для частоты вибрации 20 Гц. Данная тепловая карта согласуется со стационарным состоянием (см. рис. 5) на отметке около 30 дБ и демонстрирует высокую устойчивость к вибрации здания ТПУ в рассмотренной модели.

В более общем случае с учетом детализации элементов инфраструктуры ТПУ и увеличения числа узлов графа формируется многоуровневая сеть вибрационного взаимодействия. В частности, железнодорожные пути и тоннели действуют как активные источники и отражатели, фундаменты – как передающие и резонансные узлы, а трамвайные пути и балласт – частично поглощающие элементы. Колебания распространяются по нескольким направлениям, отражаясь и взаимодействуя, при этом создается сложная динамическая структура.

Имитационная графовая модель, а также интеллектуальные методы и технологии, использованные в VibCalc, позволяют не только визуализировать эти связи, но и количественно оценить уровень передачи энергии между элементами, определить зоны риска, где происходит усиление вибраций, и

спрогнозировать поведение системы при изменении частот и нагрузок. Полученные результаты применяются для построения прогнозных сценариев, оптимизации виброизоляционных решений и формирования рекомендаций по обеспечению вибробезопасности транспортных сооружений в условиях плотной городской застройки.

Результаты моделирования в VibCalc применительно к ТПУ подтвердили пригодность интеллектуальных методов для анализа сложных вибрационных процессов и показали, что система может быть использована как инструмент поддержки проектных решений, а также решений, связанных с мониторингом и виброзащитой транспортных сооружений.

Важно отметить, что при моделировании с применением VibCalc учитываются динамические эффекты, которые не фиксируются в статической модели. Таким образом, программный комплекс VibCalc может служить инструментом, дополняющим традиционные технологии и методы, и рассматриваться в качестве ключевого звена интеллектуальной СППР. Интеграция интеллектуальной СППР с мониторинговыми комплексами с автоматическим обновлением данных в реальном времени позволит повысить надежность и безопасность транспортных сооружений. К особенностям разработанного программного обеспечения относятся гибкость рассматриваемых моделей, компактность, производительность, масштабируемость, поддержка существующих стандартов. Результаты разработки методического и алгоритмического обеспе-

чения для комплекса VibCalc могут быть использованы для решения задач моделирования, оценки и прогнозирования вибрационных воздействий на элементы транспортной инфраструктуры, а также задач разработки интеллектуальных систем управления в транспортной отрасли.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ольмезова А.Х. Концепция создания транспортно-пересадочных узлов как основных элементов транспортной инфраструктуры // *Международный журнал прикладных наук и технологий Integral*. 2020. № 4. С. 20. EDN: CEGHLZ.
2. Транспортно-пересадочные узлы // Градостроительный комплекс Москвы. URL : <https://stroimsk.ru/mkzhd/transportno-periesadochnyie-uzly> (дата обращения 21.10.2025).
3. Цукерников И.Е., Смирнов В.А. Измерения и анализ вибрации, вызванной движением поездов метрополитена на близлежащие здания и разработка мероприятий по их снижению // *Ученые записки физического факультета Московского университета*. 2017. № 5. С. 1751416. EDN: YPDDDC.
4. Дашевский М.А., Мондрус В.Л., Моторин В.В. Концепция виброзащиты зданий и сооружений в поле строительных нормативов РФ // *Academia. Архитектура и строительство*. 2018. № 4. С. 109–115. EDN: SRBZAD. doi:10.22337/2077-9038-2018-4-109-115
5. Прогнозирование вибрации рельсового транспорта в помещениях жилых и общественных зданий / И.Е. Цукерников, И.Л. Шубин, Т.О. Невенчанная, Л.А. Тихомиров // *Noise Theory and Practice*. 2023. Т. 9, № 2(33). С. 82–93. EDN: VJHSWZ.
6. Численный анализ вибрационного воздействия метрополитенана многоэтажное здание / Л.Г. Пастухова, В.Н. Алехин, А.А. Антипин [и др.] // *Академический вестник УралНИИПроект РААСН*. 2016. № 4(31). С. 72–78. EDN: XHTQPI.
7. Степанов К.Д., Локтев А.А., Ярмоленко В.А. Моделирование вибрационного воздействия от поездов метрополитена на проектируемое здание и подбор параметров системы виброакустической защиты // *Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство*. 2018. Т. 12, № 12(12). С. 19–25. EDN: UUCOMQ.
8. Рыбина Г.В. Экспертные системы и инструментальные средства для их разработки: некоторые итоги // *Информационно-измерительные и управляющие системы*. 2013. Т. 11, № 5. С. 35–48. EDN: QIUQEF.
9. Рыбина Г.В., Горшков В.С. Особенности применения задачно-ориентированной методологии и интеллектуальной программной среды инструментального комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ для автоматизированного построения интеллектуальных систем поддержки принятия решений реального времени // *Информационно-измерительные и управляющие системы*. 2025. Т. 23, № 2. С. 51–66. EDN: XVKPII. doi:10.18127/j20700814-202502-07
10. Дружинина О.В., Масина О.Н. Методы анализа устойчивости систем интеллектуального управления. Москва : Изд. дом URSS, 2016. 248 с.
11. Еремеев А.П. Методы и программные средства интеллектуальной поддержки принятия решений для мониторинга и управления сложными техническими устройствами // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2019. № 1(1). С. 63–74. EDN: TVUXBV. (Технические науки).
12. Модели и механизмы безопасного интеллектуального управления развивающимися транспортными системами городских агломераций / Л.А. Баранов, В.Г. Сидоренко, Е.П. Балакина, Л.Н. Логина // *Интеллектуальные транспортные системы : материалы II Международной научно-практической конференции*, Москва, 25 мая 2023 г. Москва : Российский университет транспорта, 2023. С. 38–44. EDN: TNJECG. doi:10.30932/9785002182794-2023-38-44
13. Бузикаева А.В. Моделирование интеллектуальной системы управления электроприводом в условиях действия различных критериев // *Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона*. 2024. № 4(41). С. 11–19. EDN: FTJUJO.
14. Сивицкий Д.А. Анализ опыта и перспектив применения искусственных нейронных сетей на железнодорожном транспорте // *Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения*. 2021. № 2(57). С. 33–41. EDN: EPTXTN. doi:10.52170/1815-9265_2021_57_33
15. Кулагин М.А., Сидоренко В.Г. Обобщение опыта решения задач предиктивной аналитики на железнодорожном транспорте // *Наука и техника транспорта*. 2024. № 4. С. 55–62. EDN: ANLBHL.
16. Баранов Л.А., Уваров С.С., Лызлов С.С. О рисках использования аппарата искусственного интеллекта в задачах принятия решений // *Интеллектуальные транспортные системы : материалы III Международной научно-практической конференции*, Москва, 30 мая 2024 г. Москва : Российский университет транспорта (МИИТ), 2024. С. 33–38. EDN: CUZYG. doi:10.30932/9785002446094-2024-33-38
17. Степанов К.Д., Дружинина О.В., Петров А.А. Анализ моделей и разработка программного комплекса для оценки влияния вибрационных воздействий транспортных средств на объекты городской инфраструктуры // *Нелинейный мир*. 2024. Т. 22, № 1. С. 5–14. EDN: PHKINW. doi:10.18127/j20700970-202401-01
18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025611332 Российская Федерация. Программа для моделирования пространственных взаимодействий инфраструктурных объектов в зонах повышенной вибрации : заявл. 16.12.2024 : опублик. 17.01.2025 / А. А. Петров, К. Д. Степанов, О. В. Дружинина. EDN: QOSJTW.
19. Власов М.А., Простов С.М., Соколов М.В. Выбор рациональных параметров геомеханической модели грунтового основания сооружения в ПК Plaxis 3D // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2023. № 5(159). С. 4–14. EDN: YXSEYA. doi:10.26730/1999-4125-2023-5-4-14
20. Соколова О.В. Подбор параметров грунтовых моделей в программном комплексе Plaxis 2D // *Инженерно-строительный журнал*. 2014. № 4(48). С. 10–16. EDN: SFOUPH. doi:10.5862/MCE.48.2
21. Степанов К.Д., Дружинина О.В. Использование рекуррентных нейронных сетей для прогнозирования показателей вибрационной нагрузки // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. 2025. Т. 27, № 3. С. 5–12. EDN: HMWRCQ. doi:10.18127/j19998554-202503-01
22. Степанов К.Д. Использование методов искусственного интеллекта в автоматизированной системе оценки вибрационных воздействий транспортных средств на инфраструктурные объекты // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. 2025. Т. 27, № 2. С. 69–77. EDN: OIOBYF. doi:10.18127/j19998554-202502-08

23. Степанов К.Д., Дружинина О.В. Разработка алгоритмического обеспечения для оценки влияния вибрационных воздействий транспортных средств на объекты городской инфраструктуры // Нелинейный мир. 2023. Т. 21, № 4. С. 46–54. EDN: TVTFHU. doi:10.18127/j20700970-202304-06

REFERENCES

1. Olmezova A.Kh. Kontseptsiya sozdaniya transportno-peresadochnykh uzlov kak osnovnykh elementov transportnoy infrastruktury [Concept of developing transport interchange hubs as key elements of transport infrastructure] // Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh nauk i tekhnologii Integral. 2020. № 4. S. 20. EDN: CEGHLZ.
2. Transportno-peresadochnye uzly // Gradostroitelnyy kompleks Moskvy [Transport interchange hubs // Moscow urban development complex]. URL : <https://stroj.mos.ru/mkzhd/transportno-pieriesadochnnye-uzly> (data obrashcheniya: 21.10.2025).
3. Tsukernikov I.E., Smirnov V.A. Izmereniya i analiz vibratsii, vyzvannoy dvizheniem poezdov metropolitena na blizlezhashchie zdaniya i razrabotka meropriyatiy po ikh snizheniyu [Measurements and analysis of vibrations caused by subway train movement on nearby buildings and development of mitigation measures] // Uchenye zapiski fizicheskogo fakul'teta Moskovskogo universiteta. 2017. № 5. S. 1751416. EDN: YPDDDC.
4. Dashevskiy M.A., Mondrus V.L., Motorin V.V. Kontseptsiya vibrozashchity zdaniy i sooruzheniy v pole stroitelnykh normativov RF [Concept of vibration protection of buildings and structures within Russian construction standards] // Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo. 2018. № 4. S. 109–115. EDN: SRBZAD. doi: 10.22337/2077-9038-2018-4-109-115
5. Prognozirovaniye vibratsii rel'sovogo transporta v pomeshchennykh zhilykh i obshchestvennykh zdaniy [Prediction of railway transport vibration levels inside residential and public buildings] / I.E. Tsukernikov, I.L. Shubin, T.O. Nevenchannaya, L.A. Tikhomirov // Noise Theory and Practice. 2023. Т. 9, № 2(33). S. 82–93. EDN: BJHSWZ.
6. Chislennyj analiz vibratsionnogo vozdeystviya metropolitena na mnogoetazhnoe zdanie [Numerical analysis of subway-induced vibration impact on a multi-storey building] / L.G. Pastukhova, V.N. Alekhin, A.A. Antipin [i dr.] // Akademicheskii vestnik UralNIiproekt RAASN. 2016. № 4(31). S. 72–78. EDN: XHTQPJ.
7. Stepanov K.D., Loktev A.A., Yarmolenko V.A. Modelirovaniye vibratsionnogo vozdeystviya ot poezdov metropolitena na proektiruemoe zdanie i podbor parametrov sistemy vibroakusticheskoy zashchity [Modelling subway-train vibration impact on a designed building and selecting parameters of vibroacoustic protection systems] // Vnedrenie sovremennykh konstruksiy i peredovykh tekhnologiy v putevoe khozyaystvo. 2018. Т. 12. № 12(12). S. 19–25. EDN: UUCOMQ.
8. Rybina G.V. Ekspertnye sistemy i instrumentalnye sredstva dlya ikh razrabotki: nekotorye itogi [Expert systems and software tools for their development: some results] // Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy. 2013. Т. 11, № 5. S. 35–48. EDN: QIUQEF.
9. Rybina G.V., Gorshkov V.S. Osobennosti primeneniya zadachno-orientirovannoy metodologii i intellektual'noy sredy AT-TEKHNologiya dlya postroeniya sistem podderzhki prinyatiya resheniy real'nogo vremeni [Application specifics of task-oriented methodology and the AT-TECHNOLOGY intelligent environment for construct real-time decision support systems] // Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy. 2025. Т. 23, № 2. S. 51–66. EDN: XVKPIM. doi:10.18127/j20700814-202502-07
10. Druzhinina O.V., Masina O.N. Metody analiza ustoychivosti sistem intellektnogo upravleniya [Methods for analyzing the stability of intelligent control systems]. Moskva : Izd. dom URSS, 2016. 248 s.
11. Ereemeev A.P. Metody i programmnye sredstva intellektual'noy podderzhki prinyatiya resheniy dlya monitoringa i upravleniya slozhnyimi tekhnicheskimi ustroystvami [Methods and software for intelligent decision support in monitoring and controlling complex technical systems] // Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2019. № 1(1). S. 63–74. EDN: TVUXBV. (Tekhnicheskie nauki).
12. Modeli i mekhanizmy bezopasnogo intellektual'nogo upravleniya razvivayushchimisya transportnymi sistemami gorodskikh aglomeratsiy [Models and mechanisms of safe intelligent control of evolving transport systems in urban agglomerations] / L.A. Baranov, V.G. Sidorenko, E.P. Balakina, L.N. Loginova // Intellektual'nye transportnye sistemy : Materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Moskva, 25 maya 2023 g. Moskva : Rossijskij universitet transporta, 2023. S. 38–44. EDN: TNJECG. doi:10.30932/9785002182794-2023-38-44
13. Buzikaeva A.V. Modelirovaniye intellektual'noy sistemy upravleniya elektroprivodom v usloviyakh deystviya razlichnykh kriteriev [Modelling an intelligent electric-drive control system under multiple operating criteria] // Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona. 2024. № 4(41). S. 11–19. EDN: FTJUJO.
14. Sivitskiy D.A. Analiz opyta i perspektiv primeneniya iskusstvennykh neyronnykh setey na zheleznodorozhnom transporte [Analysis of experience and prospects for applying artificial neural networks in railway transport] // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. 2021. № 2(57). S. 33–41. EDN EPTXTN. doi:10.52170/1815-9265_2021_57_33
15. Kulagin M.A., Sidorenko V.G. Obobshcheniye opyta resheniya zadach prediktivnoy analitiki na zheleznodorozhnom transporte [Generalization of experience in solving predictive analytics problems in railway transport] // Nauka i tekhnika transporta. 2024. № 4. S. 55–62. EDN: ANLBHL.
16. Baranov L.A., Uvarov S.S., Lyzlov S.S. O riskakh ispol'zovaniya apparata iskusstvennogo intelekta v zadachakh prinyatiya resheniy [On risks of applying artificial intelligence tools in decision-making tasks] // Intellektual'nye transportnye sistemy : materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Moskva, 30 maya 2024 g. Moskva : Rossijskij universitet transporta (MIIT), 2024. S. 33–38. EDN CUZYGv. doi:10.30932/9785002446094-2024-33-38
17. Stepanov K.D., Druzhinina O.V., Petrov A.A. Analiz modeley i razrabotka programmnogo kompleksa dlya otsenki vibratsionnykh vozdeystviy transportnykh sredstv na ob'ekty gorodskoy infrastruktury [Analysis of models and development of a software package for assessing vibration impacts of vehicles on urban infrastructure facilities] // Nelinejnyy mir. 2024. Т. 22, № 1. S. 5–14. EDN PHKIHw. doi:10.18127/j20700970-202401-01
18. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2025611332 Rossijskaya Federatsiya. Programma dlya modelirovaniya prostranstvennykh vzaimodeystviy infrastruktury v zonakh povyshennoy vibratsii [Software for modelling spatial interactions of infrastructure objects in high-vibration zones] : zayavl. 16.12.2024. : opubl. 17.01.2025 / A.A. Petrov, K.D. Stepanov, O.V. Druzhinina. EDN: QOSJTW.

19. Vlasov M.A., Prostov S.M., Sokolov M.V. Vybór ratsionalnykh parametrov geomekhanicheskoy modeli gruntovogo osnovaniya sooruzheniya v PK Plaxis 3D [Selection of rational parameters for a geomechanical soil model of a structure using Plaxis 3D] // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2023. № 5(159). S. 4–14. EDN: YXSEYA. doi:10.26730/1999-4125-2023-5-4-14

20. Sokolova O.V. Podbor parametrov gruntovykh modeley v programmnom komplekse Plaxis 2D [Selection of parameters of soil models in the Plaxis 2D software package] // Inzhenerno-stroitel'ny zhurnal. 2014. № 4(48). S. 10–16. EDN: SFOUPH. doi:10.5862/MCE.48.2

21. Stepanov K.D., Druzhinina O.V. Ispol'zovanie rekurrentnykh neyronnykh setey dlya prognozirovaniya pokazateley vibratsionnoy nagruzki [Use of recurrent neural networks for predicting vibration-load parameters] // Nejrokompyutery: razrabotka, primenenie. 2025. T. 27, № 3. S. 5–12. EDN: HMWRCQ. doi:10.18127/j19998554-202503-01

22. Stepanov K.D. Ispol'zovanie metodov iskusstvennogo intellekta v avtomatizirovannoy sisteme otsenki vibratsionnykh vozdeystviy transportnykh sredstv na infrastrukturu [Use of artificial intelligence methods in an automated system for assessing vehicle-induced vibration on infrastructure objects] // Nejrokompyutery: razrabotka, primenenie. 2025. T. 27, № 2. S. 69–77. EDN: OIOBYF. doi:10.18127/j19998554-202502-08

23. Stepanov K.D., Druzhinina O.V. Razrabotka algoritmicheskogo obespecheniya dlya otsenki vibratsionnykh vozdeystviy transportnykh sredstv na ob'ekty gorodskoy infrastruktury [Development of algorithmic tools for assessing vibration impact of vehicles on urban infrastructure facilities] // Nelinejnyj mir. 2023. T. 21, № 4. S. 46–54. EDN: TVTFHU. doi:10.18127/j20700970-202304-06

Информация об авторах

К.Д. Степанов – соискатель кафедры «Транспортное строительство»;

О.В. Дружинина – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Отделения 6; профессор кафедры «Транспортное строительство».

Information about the authors

K.D. Stepanov – Post-graduate Student, Department of Transport Construction;

O.V. Druzhinina – Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor, Chief Researcher, Department 6, Federal Research Center «Informatics and Control» of Russian Academy of Sciences; Professor, Department of Transport Construction.

Статья поступила в редакцию 10.11.2025; одобрена после рецензирования 28.11.2025; принята к публикации 28.11.2025.

The article was submitted: 10.11.2025; approved after reviewing: 28.11.2025; accepted for publication: 28.11.2025.

Научная статья
УДК 656.22
doi:10.31079/2415-8658-2025-4-107-112

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ГРУЗОПОТОКА НА УЧАСТКЕ ОБРАЩЕНИЯ КОЛЬЦЕВЫХ МАРШРУТНЫХ ПОЕЗДОВ

Суханов Георгий Иванович¹, Доможирова Алёна Дмитриевна²

^{1,2} Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия

¹ sukhanov_gi@irgups.ru

² zenitALENA@mail.ru

Аннотация. Рассматривается вопрос отклонения величины грузопотока от нормативного значения на участках обращения кольцевых маршрутных поездов. Выявлены периоды восстановления нормативной величины грузопотока в рамках представленной выборки. Построены регрессионные модели, с помощью которых определен характер зависимости потерь грузопотока от продолжительности периодов восстановления. В качестве объектов исследования выбраны три участка Восточного полигона, отличающиеся друг от друга различным техническим оснащением.

Ключевые слова: кольцевые маршрутные поезда, грузопоток, период восстановления, участки обращения, нормативная величина грузопотока

Original article

RESTORATION OF CARGO FLOW ON THE SECTION OF CIRCULATION OF SHUTTLE TRAINS

Sukhanov Georgiy I.¹, Domojirova Alena D.²

^{1,2} Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

¹ sukhanov_gi@irgups.ru

² zenitALENA@mail.ru

Abstract. The article examines the issue of deviation of the freight flow value from the standard value on the sections of circulation of shuttle trains. The periods of recovery of the standard freight flow value within the presented sample are determined. Regression models are constructed, with the help of which the nature of the dependence of freight flow losses on the duration of recovery periods is determined. Three sections of the Eastern polygon, differing from each other in their technical equipment, were selected as objects of study.

Keywords: shuttle trains, freight flow, recovery period, circulation areas, standard freight flow value

Введение

Для участков обращения кольцевых маршрутных поездов главной функциональной задачей является продвижение грузопотока заданной величины. Данный процесс может быть прерван техническими или технологическими отказами, вследствие чего происходит уменьшение объема груза, перевозимого в кольцевых маршрутных поездах. После возникших сбоев в работе участков обращения данной категории поездов происходит восстановление величины грузопотока. Для показателей работы участка важно, чтобы это время было как можно меньшим. В данной статье рассматривается вопрос влияния продолжительности восстановления нормативной величины грузопотока на снижение данного показателя.

Определение периодов восстановления грузопотока

Продвижение грузопотока, величина которого меньше нормы, является невыполнением функциональной задачи, или функциональным отказом. Согласно [1], функциональный отказ – это событие невыполнения функциональной задачи вследствие нарушения информационного процесса. Данное определение возможно использовать, описывая функциональные отказы в транспортных процессах, поскольку информационные и транспортные системы имеют сходство. Так, в [2] было представлено сравнение информационной и транспортной сетей, имеющих одинаковое количество уровней в архитектурах систем и их схожие характеристики. Информационные и транспортные системы включают в себя три уровня (табл. 1).

Архитектуры информационной и транспортной систем

Уровень	Информационная система	Транспортная система
Внутренний	Процессы, протекающие с помощью физических каналов и устройств в информационных системах	Использование подвижного состава и устройств инфраструктуры в транспортных системах
Промежуточный	Совокупность процессов между различными абонентскими системами	Взаимодействие различных подразделений перевозчика в транспортной системе
Внешний	Совокупность прикладных процессов, протекающих в удаленных абонентских системах	Совокупность взаимоотношений грузоотправителей и грузополучателей в транспортной системе

Для описания хода исследования примем, что длительность устранения функционального отказа равна длительности восстановления нормативной величины грузопотока. Тогда момент возникновения на участке грузопотока меньше установленной величины будет являться моментом начала восстановления нормативной величины грузопотока, а момент достижения грузопотока нормативной величины будет считаться моментом окончания восстановления нормативной величины грузопотока. Время между двумя описанными моментами (количество суток) примем в качестве времени восстановления нормативной величины грузопотока.

При грузопотоке величиной меньше нормы возникают потери, которые возможно определить по следующему выражению:

$$\text{если } \Gamma_k < \Gamma_{\text{норм}}, \text{ то } \Delta\Gamma_{\text{пот}i} = \Gamma_{\text{норм}} - \Gamma_k, \quad (1)$$

где Γ_k – значение грузопотока в отдельных сутках; $\Gamma_{\text{норм}}$ – нормативное значение грузопотока на участке; k – порядковый номер суток в исследуемой выборке:

$$\text{если } \Gamma_k \geq \Gamma_{\text{норм}}, \text{ то } \Delta\Gamma_{\text{пот}i} = 0. \quad (2)$$

Суммарные потери за исследуемую выборку определяются по формуле:

$$\sum_{i=1}^n \Delta\Gamma_{\text{пот}} = \Delta\Gamma_{\text{пот}1} + \Delta\Gamma_{\text{пот}2} + \Delta\Gamma_{\text{пот}3} + \dots + \Delta\Gamma_{\text{пот}n}, \quad (3)$$

где i – номер периода восстановления участком нормативной величины грузопотока; $\Delta\Gamma_{\text{пот}i}$ – потери грузопотока за i -й период восстановления; n – количество периодов восстановления участком нормативной величины грузопотока за исследуемую выборку.

На участке А за первый период восстановления (17 сут) суммарная потеря грузопотока кольцевых маршрутных поездов составила 66 420 т. Второго периода восстановления составил 4 сут, а потери – 18 840 т. Третий период – 19 сут, потери – 68 820 т, а суммарный недозвезенный груз за всю исследуемую выборку равен 154 080 т.

Анализ продолжительности периодов восстановления и величин потерь грузопотока может использоваться для определения мер для повышения эффективности обращения кольцевых маршрутных поездов. Так, достаточно продолжительный промежуток времени при восстановлении участком установленного значения грузопотока у кольцевых маршрутных поездов свидетельствует о системном невыполнении заданной величины грузопотока. Для решения данной проблемы требуется более комплексный подход при реализации мер, направленных на повышение эффективности работы участка. Такой мерой может служить корректировка расписания кольцевых маршрутных поездов, сокращение количества пар поездов за счет увеличения массы поезда груженого состава и др. Для периодов с временем восстановления от 1 до 6 сут возможно рассмотреть более точечную меру, например, повышение надежности технических средств, чаще всего выходящих из работоспособного состояния, дополнительные и усиленные меры по борьбе со смерзаемостью груза и др.

На рис. 1–3 представлены изменения величины грузопотока: красным цветом обозначены значения грузопотока в сутках меньше нормативной величины, зеленым – равные или больше установленного грузопотока.

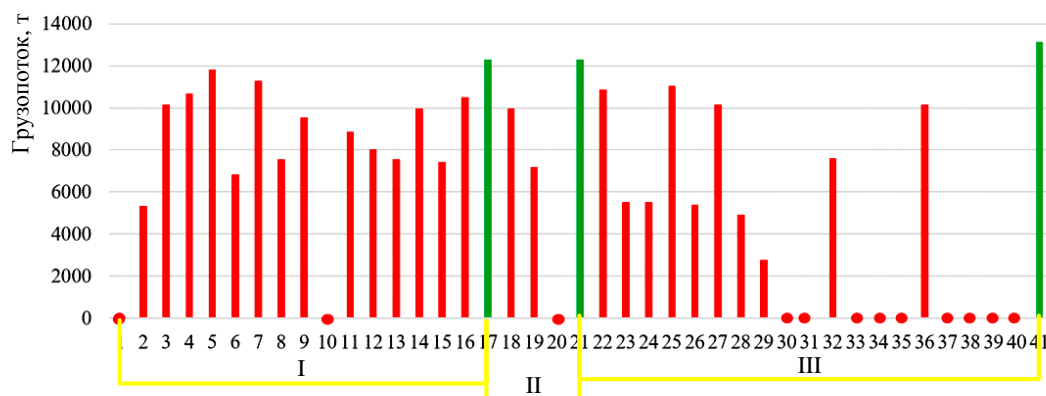


Рис. 1. Периоды восстановления грузопотока на участке А (фрагмент выборки)

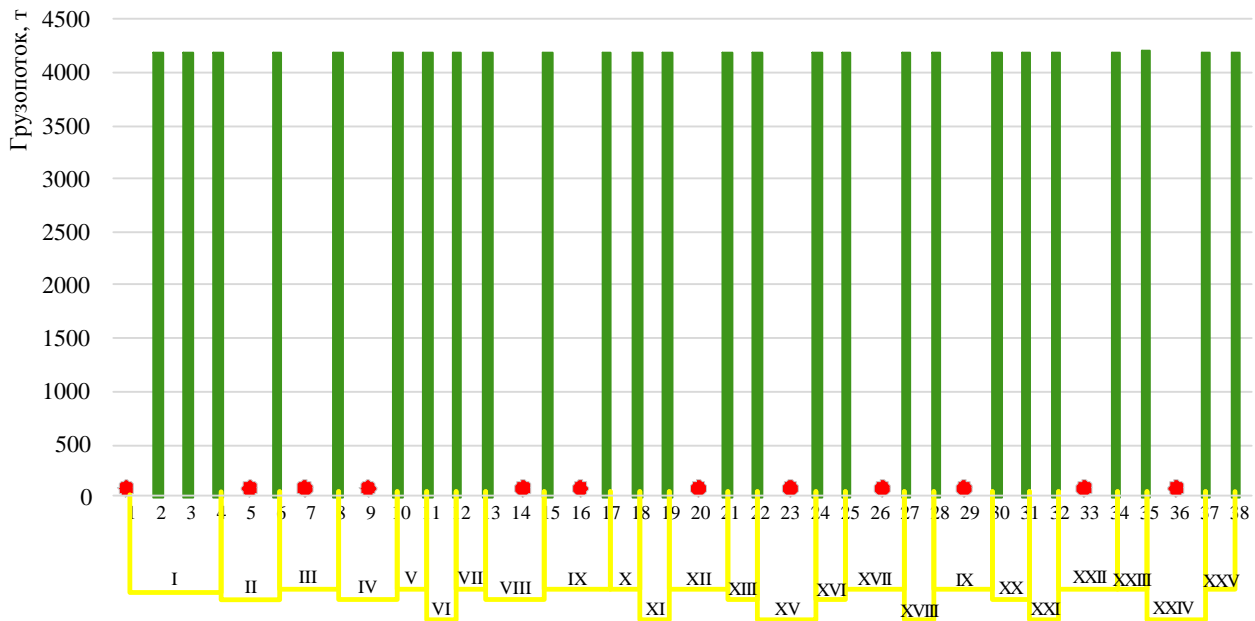


Рис. 2. Периоды восстановления грузопотока на участке Б (фрагмент выборки)

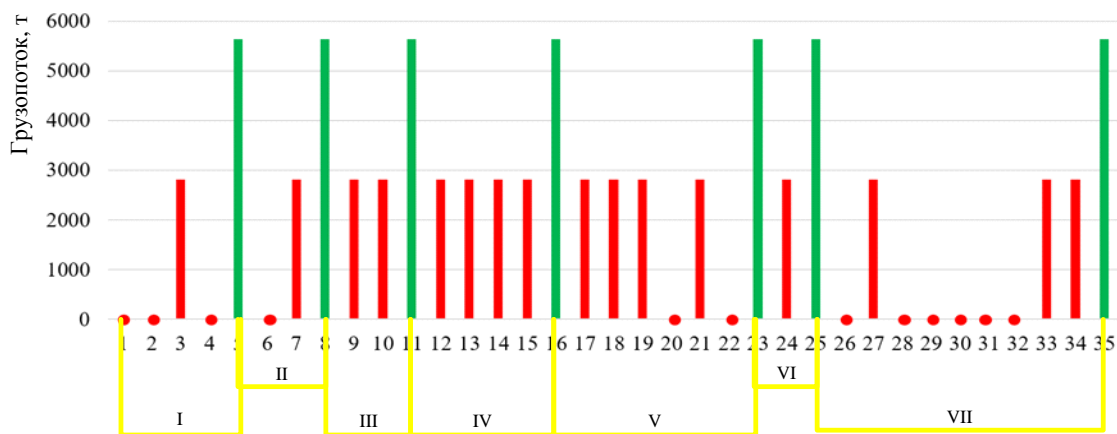


Рис. 3. Периоды восстановления грузопотока на участке В (фрагмент выборки)

Влияние периода восстановления на потери грузопотока участка

Для изучения взаимосвязи между периодами восстановления и потерями грузопотока проведем регрессионный анализ с помощью MS Excel. Построение регрессии позволит определять потери грузопотока при любом периоде восстановления. Так, например, в исследуемой выборке участка А отсутствуют периоды: 1, 11, 12, 14, 15, 16, 19 сут. Полученная регрессия позволит рассчитывать потери грузопотока при перечисленных и других продолжительностях восстановления нормативной величины грузопотока.

В системе MS Excel удобно строить регрессионные модели и определять по одному из критериев адекватности модели (коэффициенту детерминации R^2) их качество. Значение данного коэффициента показывает, насколько фактические данные совпадают с дан-

ными, полученными с помощью модели. Коэффициент детерминации определяется по формуле

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y - \hat{y})^2}{\sum(y - \bar{y})^2} \quad (4)$$

где \bar{y} – среднее значение грузопотока; \hat{y} – модельное значение грузопотока.

С использованием MS Excel возможно построить следующие регрессионные модели: экспоненциальную, линейную, логарифмическую, полиномиальную, степенную. Регрессионные модели были построены на основе данных о грузопотоке участка А, Б и В Восточного полигона. Значения коэффициентов детерминации для данных моделей приведены в табл. 2.

Для всех трех исследуемых участков, согласно коэффициентам детерминации R^2 , наиболее точной стала полиномиальная модель 3-й степени.

Графики зависимостей потерь грузопотока от времени восстановления представлены на рис. 4–6.

Таблица 2

Значения коэффициентов детерминации регрессионных моделей

Вид регрессионной модели	Значение коэффициента детерминации регрессионных моделей		
	Участок А	Участок Б	Участок В
Экспоненциальная	0,6898	0,8086	0,5018
Логарифмическая	0,6553	0,8875	0,9104
Линейная	0,8177	0,9859	0,9485
Полиномиальная	2-я степень	0,8627	0,9874
	3-я степень	0,9222	0,9896
Степенная	0,797	0,9621	0,6496

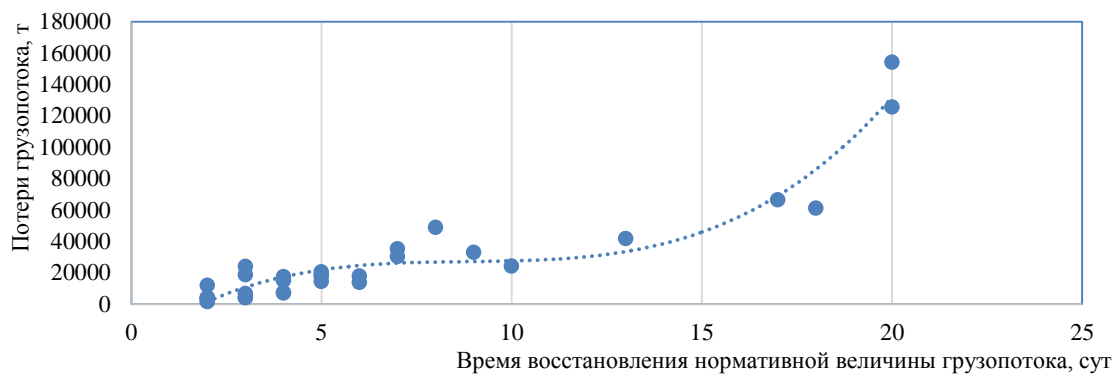


Рис. 4. Зависимости потерь грузопотока от времени восстановления нормативной величины грузопотока на участке А

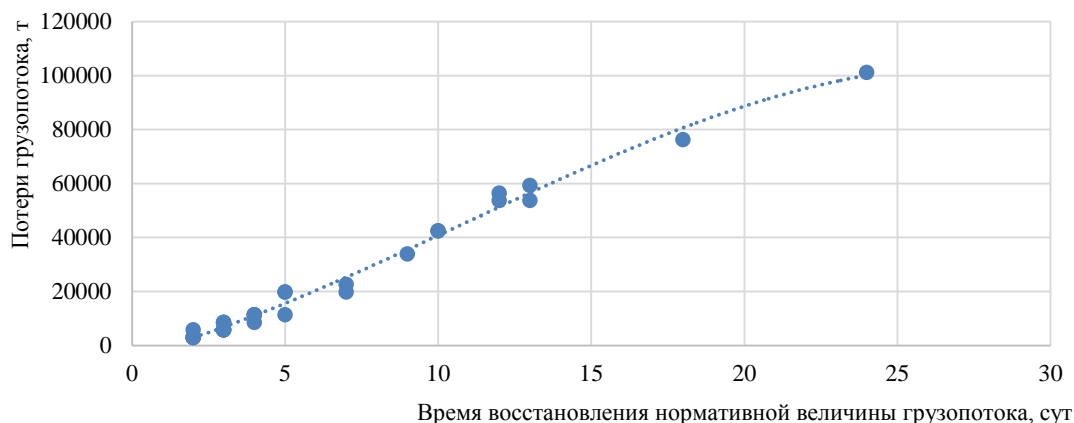


Рис. 5. Зависимости потерь грузопотока от времени восстановления нормативной величины грузопотока на участке Б

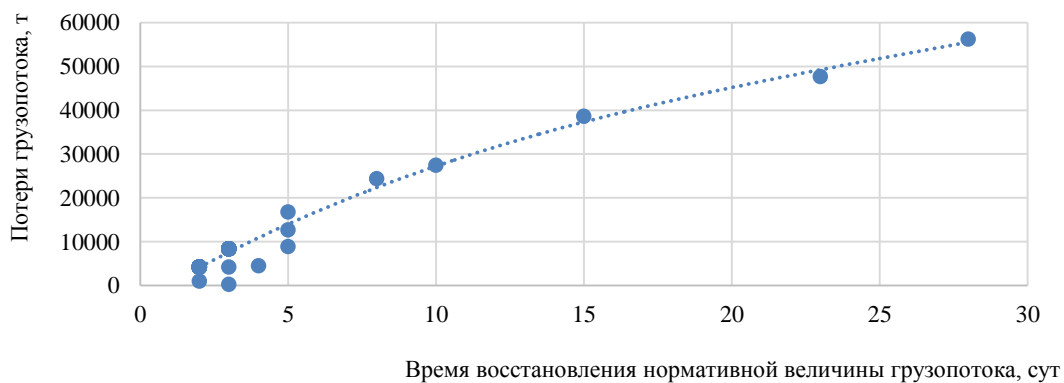


Рис. 6. Зависимости потерь грузопотока от времени восстановления нормативной величины грузопотока на участке В

В табл. 3 представлены уравнения регрессии и коэффициенты детерминации для данных участков А, Б и В. Полиномиальный вид регрессии для всех трех участков выбран из-за самых высоких значений коэффициентов детерминации и наиболее точного графического описания изменения величины потерь грузопотока.

Таблица 3

Уравнения и коэффициенты детерминации R² построенных регрессий

Уча- сток	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации R ²
А	$y = 73,306x^3 - 1946,4x^2 + 17509x - 26242$	0,9222
Б	$y = -6,4253x^3 + 208,52x^2 + 3028,6x - 3949,3$	0,9896
В	$y = 1,2658x^3 - 101,05x^2 + 3940x - 3324,8$	0,9727

С помощью полученных моделей с достаточно высокими достоверностями аппроксимации возможно определять потери грузопотока, имея данные о продолжительности восстановления участком нормативной величины грузопотока. В других условиях, при увеличении количества уровней колебаний грузопотока, может потребоваться использование моделей, способных получать результаты более точные, чем полиномиальный. Такими моделями могут быть ARIMA, SARIMA или нейросетевые.

Определим потери грузопотока для всех периодов восстановления начиная с 1 и до максимально-го в исследуемой выборке.

На основе построенных регрессий возможно прогнозировать величины потерь грузопотока при различных значениях периодов восстановления грузопотока. Так, к примеру, в исследуемой выборке на участке В не оказалось периода восстановления, равного 27 сут. С помощью построенной модели удалось рассчитать ожидаемые потери грузопотока в данном периоде, которые составили бы 54 304,49 т.

Выводы

Результаты исследования позволяют получить данные о периодах восстановления и потерях грузопотока, которые возможно будет сопоставлять со стоимостью и сроками реализации мероприятий, улучшающих работу участка. Это важно при выборе корректировочных мер, направленных на сокращение потерь при их функционировании и повышении эффективности работы участков. Например, в зимние месяцы может быть целесообразен ввод дополнительных мер по борьбе со смерзаемостью груза. Выбор должен основываться на стоимости мероприятия и соотношении ее с экономическими потерями из-за недозвезенного груза, а сроки реализации на конкретных станциях погрузки и выгрузки – с временем восстановления грузопотока на участке.

Таблица 4

Значения потерь грузопотока на участках, полученные на основе уравнений регрессии

Участок А		Участок Б		Участок В	
Период восстановления, сут	Потери грузопотока, т	Период восстановления, сут	Потери грузопотока, т	Период восстановления, сут	Потери грузопотока, т
1	-10 606,094	1	-718,605	1	515,4158
2	1576,848	2	2890,578	2	4161,126
3	10 746,662	3	6839,697	3	7619,927
4	17 343,184	4	11 090,2	4	10 899,41
5	21 806,25	5	15 603,54	5	14 007,18
6	24 575,696	6	20 341,16	6	16 950,81
7	26 091,358	7	25 264,5	7	19 737,92
8	26 793,072	8	30 335,03	8	22 376,09
9	27 120,674	9	35 514,18	9	24 872,92
10	27514	10	40 763,4	10	27236
11	28 412,886	11	46 044,15	11	29 472,93
12	30 257,168	12	51 317,86	12	31591,3
13	33 486,682	13	56 546	13	33 598,71
14	38 541,264	14	61 690	14	35 502,76
15	45 860,75	15	66 711,31	15	37 311,03
16	55 884,976	16	71 571,39	16	39 031,12
17	69 053,778	17	76 231,68	17	40 670,63
18	85 806,992	18	80 653,63	18	42 237,15
19	106 584,454	19	84 798,69	19	43 738,27
20	131 826	20	88 628,3	20	45 181,6
		21	92 103,92	21	46 574,72
		22	95 186,99	22	47 925,24
		23	97 838,95	23	49 240,74
		24	10 0021,3	24	50 528,82
				25	51 797,08
				26	53 053,1
				27	54 304,49
				28	55 558,84

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шубинский И. Б. Функциональная надежность информационных систем. Методы анализа. Москва : Журнал Надежность, 2012. 296 с.
2. Тимухина Е.Н. Повышение безопасности функционирования и надежности транспортных объектов при технологических сбоях : монография. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2014. 112 с.
3. Кутузов О.И., Татарникова Т.М. Общее в подходе к имитационному моделированию инфокоммуникационных и транспортных сетей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19, № 5. С. 912–917.
4. Доможирова А.Д. Влияние устойчивости функционирования на экономические показатели участка обращения кольцевых маршрутных поездов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2024. № 3(63). С. 16–25.
5. Суханов Г.И., Большаков Р.С., Супруновский А.В. Современные аспекты планирования технологических перерывов // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2023. № 4(37). С. 101–108.

REFERENCES

1. Shubinsky I.B. Funktsional'naya nadezhnost' informatsionnykh sistem. Metody analiza [Functional reliability of information systems. Analysis methods]. Moskva : Zhurnal «Nadezhnost», 2012. 296 s.
2. Timuhina E.N. Povyshenie bezopasnosti funktsionirovaniya i nadezhnosti transportnykh obektov pri tehnologicheskikh sboyakh [Improvement of operation safety and reliability of transport facilities in case of technological failures] : monografiya. Yekaterinburg : Izd-vo UrGUPS, 2014. 112 s.
3. Kutuzov O.I., Tatarnikova T.M. Obshcheye v podkhode k imitatsionnomu modelirovaniyu infokommunikatsionnykh i transportnykh setey [Common ground between approaches to simulation modeling of infocommunication and transport networks] /// Nauchno-tekhnicheskij vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki. 2019. T. 19, № 5. S. 912–917.
4. Domozhirova A.D. Vliyaniye ustoychivosti funktsionirovaniya na ekonomicheskiye pokazateli uchastka obrashcheniya kol'tsevykh marshrutnykh poyezdov [Influence of stability of operation on economic indicators for circulation section of ring block trains] // Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. 2024. № 3(63). S. 16–25.
5. Sukhanov G.I., Bol'shakov R.S., Suprunovskiy A.V. Sovremennye aspekty planirovaniya tekhnologicheskikh pereryvov [Modern aspects of planning technological breaks] // Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona. 2023. № 4(37). S. 101–108.

Информация об авторах

Г.И. Суханов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой»;
А.Д. Доможирова – старший преподаватель кафедры «Управление эксплуатационной работой».

Information about the authors

G.I. Sukhanov – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Operational Work Management;
A.D. Domozhirova – Senior Lecturer, Department of Operational Work Management.

Статья поступила в редакцию 23.06.2025; одобрена после рецензирования 19.09.2025; принята к публикации 19.09.2025.
The article was submitted: 23.06.2025; approved after reviewing: 19.09.2025; accepted for publication: 19.09.2025.

Научная статья
УДК 656.259.12
doi:10.31079/2415-8658-2025-4-113-118

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПЕРВИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЛЬСОВОЙ ЦЕПИ К ИЗМЕНЕНИЮ ПРОВОДИМОСТИ ИЗОЛЯЦИИ

Тарасов Евгений Михайлович¹, Надежкин Вадим Александрович², Надежкина Снежана Андреевна³

^{1, 2, 3} Приволжский государственный университет путей сообщения, Самара, Россия

¹ e.tarasov@samgups.ru

² vadim_nadezhkin@mail.ru

³ snezhana.sarychtva.97@mail.ru

Аннотация. Рассмотрено формирование алгоритмической модели рельсовой линии как ключевого элемента рельсовой цепи и главного объекта железнодорожной инфраструктуры. На основе известных подходов рельсовая линия представлена в виде композиционной модели посредством симметричного четырехполюсника с распределенными параметрами. С использованием программно-математического пакета Python проведено имитационное моделирование с анализом влияния проводимости изоляции на первичные информативные параметры рельсовой линии. В ходе исследовательской работы получены визуализируемые зависимости первичных информативных параметров от предела изменения проводимости изоляции и установлены их диапазоны изменения, в которых наблюдается экспоненциальное изменение электрических параметров. Сформированная алгоритмическая модель рельсовой линии оказалась адекватной и корректной, что может быть использовано для дальнейших научных исследований и решения задач в области диагностики и мониторинга состояния железнодорожной инфраструктуры.

Ключевые слова: математическое моделирование, проводимость изоляции, рельсовая линия, алгоритмическая модель, информативные первичные параметры, рельсовая цепь

Original article

ANALYSIS OF THE SENSITIVITY OF THE PRIMARY PARAMETERS OF THE RAIL CIRCUIT TO CHANGES IN INSULATION CONDUCTIVITY

Tarasov Evgeny M.¹, Nadezhkin Vadim A.², Nadezhkina Snezhana A.³

^{1, 2, 3} Volga State Transport University, Samara, Russia

¹ e.tarasov@samgups.ru

² vadim_nadezhkin@mail.ru

³ snezhana.sarychtva.97@mail.ru

Abstract. The article is devoted to the formation of an algorithmic model of the rail line as a key element of the rail chain and the main object of the railway infrastructure. Based on well-known approaches, the rail line is presented by the authors as a composite model using a symmetrical four-pole with distributed parameters. Simulation modeling was carried out using the Python software-and-mathematical package, with an analysis of the influence of insulation conductivity on the primary informative parameters of the rail line. In the course of the research, the visualized dependences of the primary informative parameters on the limit of change in insulation conductivity were obtained and their ranges of change were established, in which an exponential change in electrical parameters is observed. The formed algorithmic model of the rail line proved to be adequate and correct, which can be used for further scientific research and solving problems in the field of diagnostics and monitoring of the state of the railway infrastructure.

Keywords: mathematical modeling, insulation conductivity, rail line, algorithmic model, informative primary parameters, rail circuit

Введение

В рамках представленной работы для разработки математической модели рельсовой цепи (РЦ), адекватно описывающей ее электрические и физические свойства, объект железнодорожной инфраструктуры, в частности, рельсовая линия (РЛ), являющаяся чувствительным элементом РЦ и компонентом передачи содержательной информации о контрольном состоянии железнодорожного пути, рассматривается в качестве симметричного четырехполюсника [1]. Согласно [2], РЛ представляется в виде каскадного

соединения четырехполюсников и визуализируется посредством основной схемы замещения в качестве линии с равномерно распределенными параметрами. Такая композиционная модель представления РЛ позволяет более удобно описать электромагнитные процессы, происходящие в ней.

Материалы и методы

Уравнения состояния РЛ как объекта железнодорожной инфраструктуры описываются следующими выражениями [2–4]:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = A\dot{U}_2 + B\dot{I}_2; \\ \dot{I}_1 = C\dot{U}_2 + D\dot{I}_2; \end{cases} \quad (1)$$

где \dot{U}_1, \dot{I}_1 – комплексные амплитуды электрических параметров на входе РЛ; \dot{U}_2, \dot{I}_2 – комплексные амплитуды электрических параметров на выходе РЛ.

Отобразим коэффициенты рельсового четырехполюсника A, B, C, D через первичные параметры основной рельсовой цепи (1):

$$\begin{aligned} A &= \operatorname{ch} \gamma l; & B &= Z_g \operatorname{sh} \gamma l; \\ C &= \frac{1}{Z_g} \operatorname{sh} \gamma l; & D &= A = \operatorname{ch} \gamma l, \end{aligned} \quad (2)$$

где l – длина РЛ; γ – коэффициент распространения электромагнитной волны вдоль РЛ, $\gamma = \sqrt{(r_o + j\omega L_o)(g + j\omega C_o)}$, $r_o, j\omega L_o$ – резистивная и индуктивная составляющие сопротивления рельсовой линии; g – проводимость изоляции; C_o – результирующая ёмкость сопротивления

изоляции, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота; Z_g – волновое сопротивление РЛ, $Z_g = \sqrt{\frac{r_o + j\omega L_o}{G_o + j\omega C_o}}$ [2–4].

В рамках данной постановки задачи РЦ рассматривается в нормальном режиме работы. При таком режиме четырехполюсник представляется симметричным, а его коэффициенты (2), согласно гипотезе о симметричности $A = D$, тогда как уравнение состояния упрощается до вида [5–6]:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \operatorname{ch} \gamma l \dot{U}_2 + Z_g \operatorname{sh} \gamma l \dot{I}_2; \\ \dot{I}_1 = \frac{1}{Z_g} \operatorname{sh} \gamma l \dot{U}_2 + \operatorname{ch} \gamma l \dot{I}_2. \end{cases} \quad (3)$$

Для проведения анализа определения пределов информативных первичных параметров РЛ и характера её изменения выполнено математическое моделирование при помощи программно-математического пакета Python. Алгоритмическая блок-схема исследования пределов изменения параметров с учетом преобразования первичных параметров РЛ представлена на рис. 1.

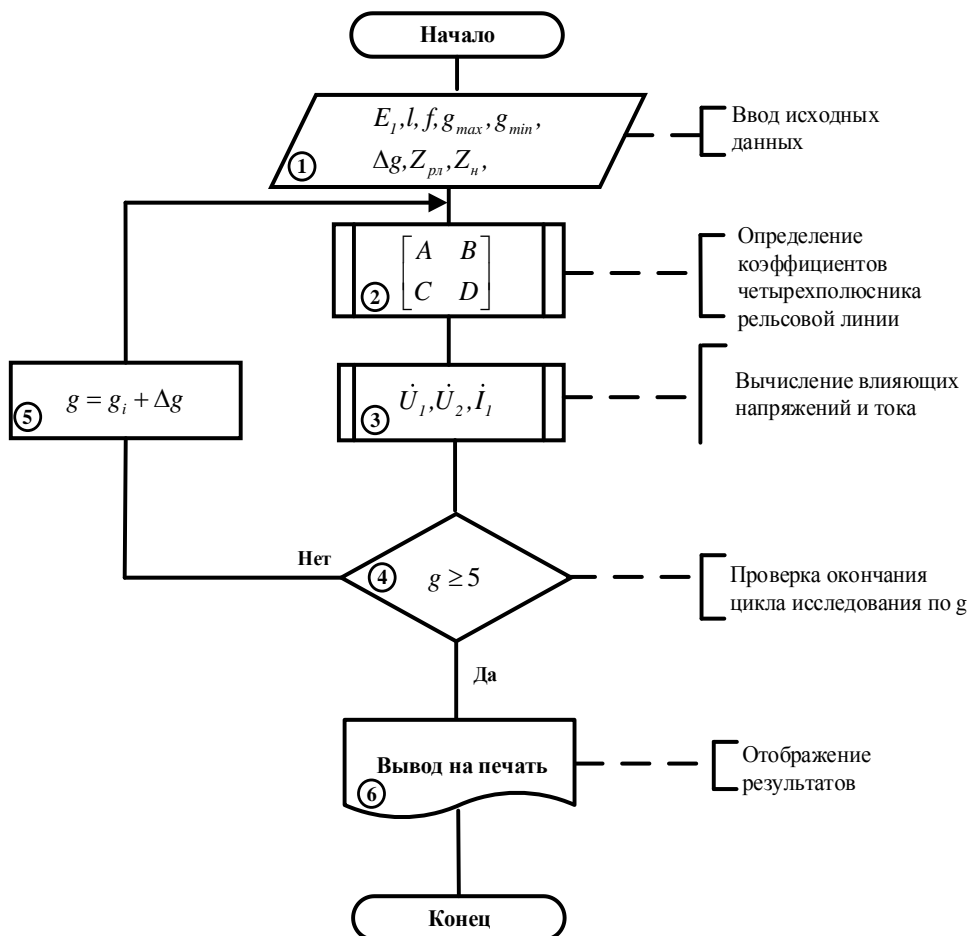


Рис. 1. Сформированная блок-схема по исследованию зависимостей первичных параметров рельсовой линии от проводимости изоляции

На основе предложенной математической модели РЛ были получены зависимости первичных информативных параметров РЛ от проводимости изоляции.

Из графиков (рис. 2, *а*, *б*) следует симметричность входных сопротивлений РЛ, т.е. подтверждается гипотеза, выдвинутая ранее о симметричности.

Математическая модель входного сопротивления РЛ, выраженная через параметры РЛ, выглядит следующим образом:

$$Z_{вхн} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} = \frac{\operatorname{ch} \gamma l Z_n + Z_г \operatorname{sh} \gamma l}{\frac{1}{Z_г} \operatorname{sh} \gamma l Z_n + \operatorname{ch} \gamma l}. \quad (4)$$

При рассмотрении уравнения входного обратного сопротивления РЛ выражение выглядит следующим образом:

$$Z_{вxo} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} = \frac{\operatorname{ch} \gamma l Z_n + Z_г \operatorname{sh} \gamma l}{\operatorname{sh} \gamma l Z_n + \operatorname{ch} \gamma l}. \quad (5)$$

На основе проведенных исследований подтвердилась корректность математической модели. При малых значениях проводимости изоляции g в диапазоне от 0,05 до 0,2 См/км наблюдается резкое уменьшение $Z_{вхн}$; при значениях проводимости изоляции g в пределах от 0,2 до 2,0 См/км график приобретает экспоненциальный характер; когда значения проводимости изоляции g варьируются в пределах от 2,0 до 5,0 См/км, график приобретает линейный характер.

Вследствие доказательства гипотезы о симметричности четырехполюсника РЛ в нормальном режиме (рис. 2, *б*) представлены идентичные содержательные данные о зависимости $Z_{вxo}$ от g (рис. 2, *а*).

При рассмотрении математической модели напряжения на входе РЛ выражение выглядит следующим образом:

$$\dot{U}_1 = \frac{\dot{E} (\operatorname{ch} \gamma l Z_n + Z_г \operatorname{sh} \gamma l)}{(\frac{1}{Z_г} \operatorname{sh} \gamma l Z_n + \operatorname{ch} \gamma l) Z_0 + \operatorname{ch} \gamma l Z_n + Z_г \operatorname{sh} \gamma l}. \quad (6)$$

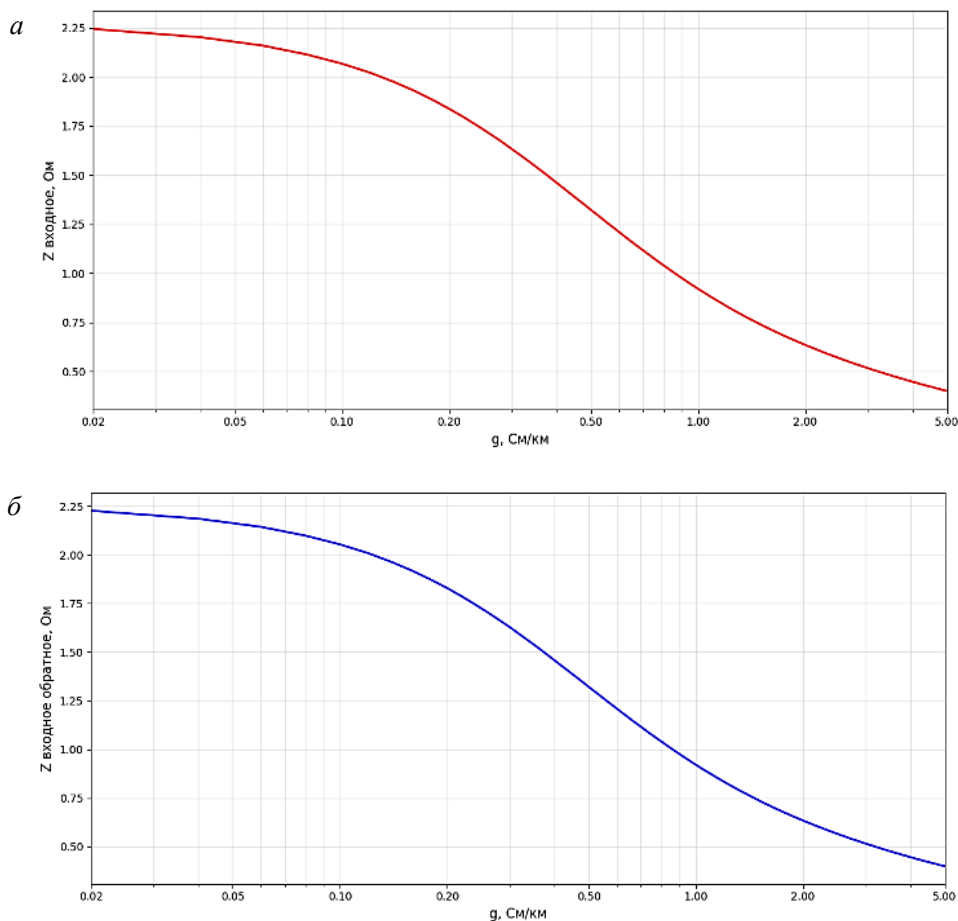


Рис. 2. Визуализация зависимости входного сопротивления от проводимости изоляции рельсовой линии в логарифмическом виде: *а* – визуализация зависимости $Z_{вхн}$ от g (4); *б* – визуализация зависимости $Z_{вxo}$ от g (5)

ANALYSIS OF THE SENSITIVITY OF THE PRIMARY PARAMETERS OF THE RAIL CIRCUIT TO CHANGES IN INSULATION CONDUCTIVITY

Также при изменении входных параметров РЛ в зависимости от пределов изменения g следует, что при анализе зависимости напряжения со стороны начала рельсовой линии от проводимости изоляции можно выделить следующие характерные диапазоны: диапазон резкого снижения наблюдается при показателях проводимости изоляции от 0,02 до 0,10 См/км; экспоненциальное уменьшение проявляется между значениями от 0,10 до 0,50 См/км; линейный характер график начинает приобретать в диапазоне значений от 0,50 до 5,00 См/км (рис. 3, а).

Математическая модель напряжения на выходе РЛ описывается следующим выражением:

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{E} Z_n}{\left(\frac{1}{Z_g} \operatorname{sh} \gamma l Z_n + \operatorname{ch} \gamma l\right) Z_0 + \operatorname{ch} \gamma l Z_n + Z_g \operatorname{sh} \gamma l} \quad (7)$$

При рассмотрении влияния проводимости изоляции на напряжение на выходе рельсовой линии становится очевидно, что в диапазоне значений от 0,02 до 0,10 См/км график отражает линейный

характер изменений, при рассмотрении параметров проводимости изоляции от 0,10 до 5,0 См/км проявляется экспоненциальное уменьшение (рис. 3, б).

В свою очередь, математическая модель тока на входе РЛ выражается следующим образом:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E} \left(\frac{1}{Z_g} \operatorname{sh} \gamma l Z_n + \operatorname{ch} \gamma l\right)}{\left(\frac{1}{Z_g} \operatorname{sh} \gamma l Z_n + \operatorname{ch} \gamma l\right) Z_0 + \operatorname{ch} \gamma l Z_n + Z_g \operatorname{sh} \gamma l} \quad (8)$$

Отражён экспоненциальный рост тока при диапазоне изменений от 0,10 до 0,50 См/км, в то время как в области значений проводимости изоляции от 0,50 до 5,00 См/км график приобретает линейный характер (рис. 4).

Соответственно, сформированная алгоритмическая модель является адекватной и корректной и позволяет на основе полученных результатов визуализировать характер изменения первичных параметров рельсовой цепи.

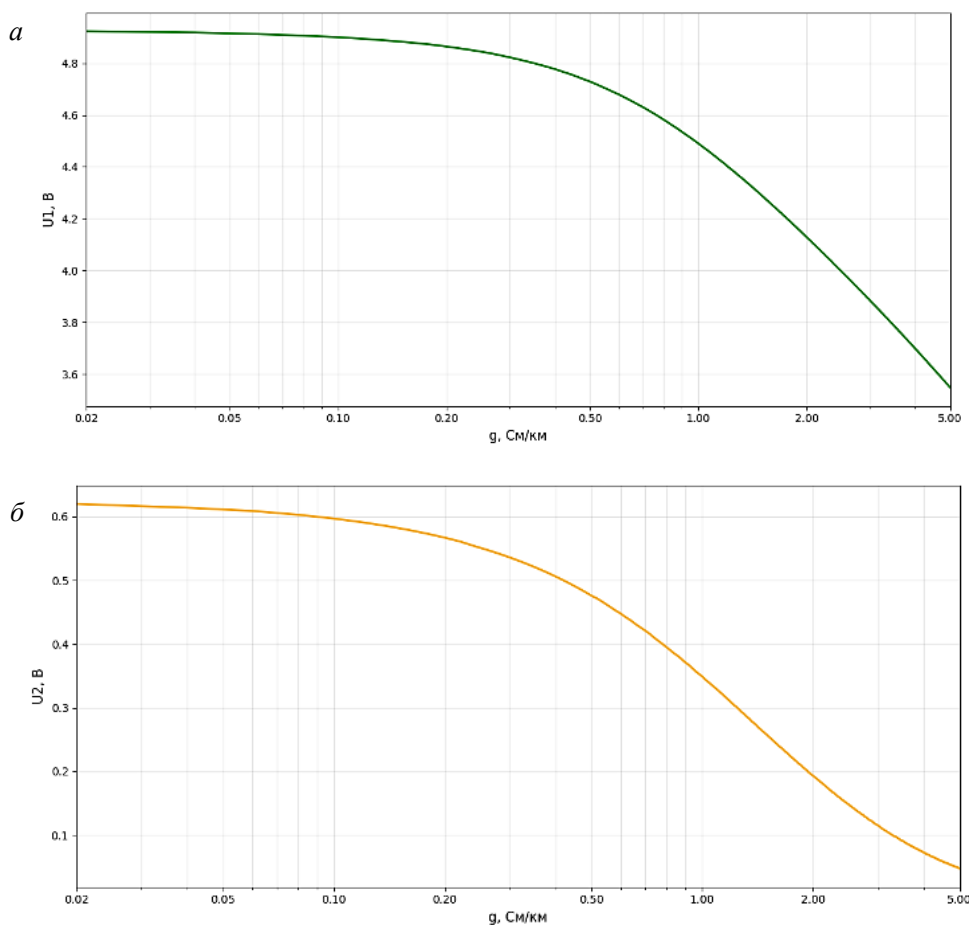


Рис. 3. Визуализация зависимости напряжения на входе и выходе рельсовой линии от проводимости изоляции в логарифмическом виде: а – визуализация зависимости напряжения на входе рельсовой линии от g (6); б – визуализация зависимости напряжения на выходе рельсовой линии от g (7)

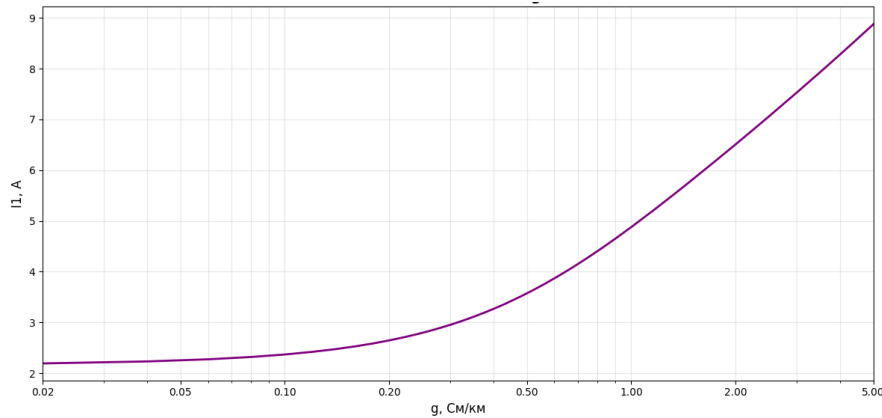


Рис. 4. Визуализация зависимости тока на входе рельсовой линии от проводимости изоляции в логарифмическом виде

Выводы

В результате проведенного исследования разработана математическая модель рельсовой линии, представленная в виде симметричного четырехполюсника и корректно описывающая электрические свойства рельсовой линии. Путем математического анализа установлены характерные пределы изме-

нения проводимости изоляции, при которых наблюдается различный характер влияния на напряжение на входе/выходе рельсовой линии, а также на ток в ней. Полученные результаты обладают практической значимостью для дальнейших исследований в области систем диагностики и мониторинга состояния рельсовой линии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тарасов Е.М. Математическое моделирование рельсовых цепей с распределенными параметрами рельсовых линий : учебное пособие. Самара : СамГАПС, 2003. 117 с.
2. Брылеев А.М., Кравцов Ю.А., Шишляков А.В. Теория, устройство и работа рельсовых цепей. Москва : Транспорт, 1978. 344 с.
3. Аркатов В.С., Кравцов Ю.А., Степенский Б.М. Рельсовые цепи. Анализ работы и техническое обслуживание. Москва : Транспорт, 1990. 295 с.
4. Каллер М.Я., Соболев Ю.В., Богданов А.Г. Теория линейных электрических цепей железнодорожной автоматики, телемеханики и связи : учебник для вузов. Москва : Транспорт, 1987. 335 с.
5. Казиев Г.Д. Обеспечение надежной работы рельсовых цепей // Железнодорожный транспорт. 2006. № 4.
6. Тарасов Е.М., Надежкин В.А., Надежкина С.А. Исследование изменения входного сопротивления на контроль состояния изолирующих стыков // Наука и образование транспорту. 2023. № 1. С. 239–241.
7. Разработка математической модели изолирующих стыков в комплексе с дроссель-трансформаторми / Е.М. Тарасов, С.А. Вельмин, В.А. Надежкин, А.Е. Тарасова // Наука и образование транспорту. 2021. № 1. С. 316–320.
8. Сапожников В.В., Сапожников В.В., Шаманов В.И. Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи. Москва : Маршрут, 2003. 263 с.
9. Дмитренко И.Е. Техническая диагностика и автоконтроль систем железнодорожной автоматики и телемеханики. Москва : Транспорт, 1986. 144 с.
10. Потапов А.С. Распознавание образов и машинное восприятие: общий подход на основе принципа минимальной длины описания. Санкт-Петербург : Политехника, 2007. 548 с.

REFERENCES

1. Tarasov E.M. Matematicheskoye modelirovaniye rel'sovykh tsepej s raspredelennymi parametrami rel'sovykh linij [Mathematical modeling of rail circuits with distributed parameters of rail lines] : uchebnoye posobiye. Samara : SamGAPS, 2003. 117 s.
2. Bryleev A.M., Kravtsov Yu.A., Shishlyakov A.V. Teoriya, ustrojstvo i rabota rel'sovykh tsepej [Theory, device and operation of rail chains]. Moskva : Transport, 1978. 344 s.
3. Arkatov V.S., Kravtsov Yu.A., Stepensky B.M. Rel'sovye tsepi. Analiz raboty i tekhnicheskoe obsluzhivanie [Rail chains. Work analysis and maintenance]. Moskva : Transport, 1990. 295 s.
4. Kaller M.Ya., Sobolev Yu.V., Bogdanov A.G. Teoriya linejnykh elektricheskikh tsepej zheleznodorozhnoj avtomatiki, telemekhaniki i svyazi [Theory of linear electric circuits of railway automation, telemechanics and communications] : uchebnik dlya vuzov. Moskva : Transport, 1987. 335 s.
5. Kaziev G.D. Obespechenie nadezhnoj raboty rel'sovykh tsepej [Ensuring reliable operation of rail chains] // Zheleznodorozhnyy transport. 2006. № 4.
6. Tarasov E.M., Nadezhkin V.A., Nadezhkina S.A. Issledovanie izmeneniya vkhodnogo soprotivleniya na kontrol' sostoyaniya izoliruyushchikh stykov [Investigation of changes in input resistance to control the state of insulating joints] // Nauka i obrazovanie transportu. 2023. № 1. S. 239–241.

ANALYSIS OF THE SENSITIVITY OF THE PRIMARY PARAMETERS OF THE RAIL CIRCUIT TO CHANGES IN INSULATION CONDUCTIVITY

7. Razrabotka matematicheskoy modeli izoliruyushchikh stykov v komplekte s drossel'-transformatorami [Development of a mathematical model of insulating joints in combination with throttle transformers] / E.M. Tarasov, S.A. Velmin, V.A. Nadezhkin, A.E. Tarasova // Nauka i obrazovanie transportu. 2021. № 1. S. 316–320.

8. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I., Shamanov V.I. Nadezhnost' sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki, telemekhaniki i svyazi [Reliability of railway automation, telemechanics and communication systems]. Moskva : Marshrut, 2003. 263 s.

9. Dmitrenko I.E. Tekhnicheskaya diagnostika i avtokontrol' sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Technical diagnostics and auto-control of railway automation and telemechanics systems]. Moskva : Transport, 1986. 144 s.

10. Potapov A.S. Raspoznavanie obrazov i mashinnoe vospriyatie: obshchij podkhod na osnove printsipa minimal'noj dliny opisaniya [Pattern recognition and machine perception: a general approach based on the principle of minimum description length]. Sankt-Peterburg : Politehnika, 2007. 548 s.

Информация об авторах

Е.М. Тарасов – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»;

В.А. Надежкин – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»;

С.А. Надежкина – преподаватель, аспирант кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте».

Information about the authors

E.M. Tarasov – Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of the Department of Automatics, Telemechanics and Communication in Railway Transport;

V.A. Nadezhkin – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Automatics, Telemechanics and Communication in Railway Transport;

S.A. Nadezhkina – Lecturer, Post-graduate Student, Department of Automatics, Telemechanics and Communication in Railway Transport.

Статья поступила в редакцию 22.10.2025; одобрена после рецензирования 12.11.2025; принята к публикации 12.11.2025.

The article was submitted: 22.10.2025; approved after reviewing: 12.11.2025; accepted for publication: 12.11.2025.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

ПОРЯДОК ПРЕДСТАВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ В НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ «ТРАНСПОРТ АЗИАТСКО-ТИХООКЕАНСКОГО РЕГИОНА»

1. Рассмотрение работ аспирантов и соискателей ученой степени кандидата наук, магистрантов, студентов осуществляется только при **наличии рекомендации научного руководителя**.

2. Статья представляется в редакцию на русском языке в электронном виде как файл «Microsoft Word» (по эл. почте: arg-journal-ed@list.ru). **Статья оформляется согласно ГОСТу Р 7.07–2021.**

3. Обязательная структура статьи:

- код УДК;
- фамилия, имя, отчество автора (ов);
- название статьи на *русском* и *английском* языках;
- аннотация об актуальности и новизне темы статьи, главных содержательных аспектах (120–150 слов) на *русском* и *английском* языках;
- ключевые слова по содержанию статьи (8–10 слов или словосочетаний) на *русском* и *английском* языках. Каждое ключевое слово или словосочетание отделяется от другого запятой;

• текст статьи;

• список источников.

4. К рукописи статьи прилагаются сведения об авторе (ах) на русском и английском языках, включающие:

- фамилию, имя, отчество полностью;
- полное название организации в именительном падеже, город;
- адрес организации с указанием почтового индекса;
- ученую степень и ученое звание (если имеются);
- адрес электронной почты;
- телефоны для контактов;
- корреспондентский почтовый адрес.

Сведения об авторе (ах) представляются в редакцию в электронном виде как отдельный файл «Microsoft Word» (по электронной почте).

5. Поля страницы: верхнее – 2 см; нижнее – 2 см; левое – 3 см; правое – 1 см; размер бумаги – А4 (210×297 мм); шрифт – «Times New Roman» № 14; подрисовочная надпись – 12 кегль; межстрочный интервал – 1,5.

6. Обязательным является наличие **экспертного заключения** о возможности опубликования.

7. Название статьи должно четко отражать ее содержание, быть информативным, не должно включать непередаваемый сленг, известный только русскоговорящим специалистам.

В переводе названия статьи на английский язык не должно быть никаких транслитераций с русского языка, кроме непередаваемых названий собственных имен и других объектов.

8. Авторская аннотация призвана выполнять функцию независимого от статьи источника информации.

Аннотация является точным изложением содержания статьи, включающим основные фактические сведения и выводы, без дополнительной интерпретации или критических замечаний автора статьи. Аннотация не должна содержать информацию, которой нет в статье. Включение в аннотацию схем, таблиц, графиков и рисунков не допускается.

Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте аннотации. В тексте аннотации следует применять стандартизованную терминологию. Сокращения и аббревиатуры в тексте аннотации не допускаются.

Аннотация к статье должна быть информативной (не содержать общих слов), оригинальной и содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований).

Желательно, чтобы аннотация включала в себя следующие аспекты содержания статьи: предмет, тему, цель работы; метод или методологию проведения работы; основные результаты работы; область применения результатов; выводы.

9. Ключевые слова или словосочетания – это текстовые метки, представляющие содержание статьи, по которым можно найти статью при поиске и определить предметную область текста. Поэтому при подборе ключевых слов или словосочетаний следует перечислить основные термины, используемые в статье.

10. Поступившие рукописи в обязательном порядке проходят **слепое рецензирование**. Решение о публикации принимается редакционной коллегией журнала на основании следующего: положительной рецензии; соответствия представленных материалов тематической направленности журнала; научной значимости, актуальности.

Рукопись, получившая отрицательные отзывы, отклоняется и не возвращается.

Нуждающаяся в доработке статья направляется автору вместе с замечаниями рецензента. Автор должен учесть все замечания и внести изменения, указав место, в электронный вариант текста, после чего статья возвращается в редакцию, где **повторно рецензируется**. В случае несогласия с рецензентом автор должен кратко и четко обосновать свою позицию.

Редакция оставляет за собой право отклонять без рассмотрения по существу статьи, не соответствующие профилю журнала или оформленные с нарушением требований.

11. Редакция информирует авторов о причинах, которые не позволили принять решение о публикации представленных рукописей.

12. Авторы опубликованных статей несут ответственность за точность приведенных фактов, статистических данных, собственных имен и прочих сведений, а также за содержание материалов, не подлежащих открытой публикации.

13. Представляя в редакцию рукопись своей статьи, автор (ы) берет на себя обязательство не публиковать ее ни полностью, ни частично в ином издании без согласия редакции.

14. Опубликованные статьи, а также информация об авторах на русском и английском языках размещается в свободном доступе в Интернете на платформе Научной Электронной Библиотеки – eLIBRARY.RU.

15. Все статьи проходят проверку в системе «Антиплагиат» на предмет некорректных заимствований.

Материалы следует направлять по юридическому адресу журнала: 680021, г. Хабаровск, ул. Серьшева, 47, Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС), ауд.359. Редакция журнала «Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона». Электронная почта: arg-journal-ed@list.ru

AUTHORS GUIDELINES

GUIDELINES FOR SUBMITTING YOUR MANUSCRIPT TO «PACIFIC RIM COUNTRIES TRANSPORTATION SYSTEM» JOURNAL

1. Research papers from postgraduate and Ph.D. students as well as undergraduates are considered only if they have a reference letter from their research advisor.

2. Articles should be submitted to the editors in Russian or English as «MS Word» file (by e-mail: apr-journal-ed@list.ru).

The article is formatted according to GOST (Russian National Standard) 7.07-2021.

3. The paper should meet the following requirements and include:

– surname, first name, patronymic name of the author(s);

– title of the article both in *Russian* and *English*;

– abstract including 120–150 words both in Russian and English;

– key words (8–10 words or word combinations) both in *Russian* and *English*. Each key word or phrase is separated from the other by a comma;

– text of the article;

– list of references.

4. A manuscript should be accompanied by the information about the author(s) both in Russian and English, including:

– surname, first name, patronymic name;

– full name of the organization, city;

– address of the organization, indicating the postal code;

– author(s)' academic degree and academic rank (if any);

– e-mail address;

– contact telephone number;

– postal address.

Information about the author(s) should be submitted to the editorial board as «MS Word» file (by e-mail).

5. Margins of the page: top – 2 cm; bottom – 2 cm; left – 3 cm; right – 1 cm; font – «Times New Roman» 14; picture caption – 12 size; line spacing – 1,5.

6. It is obligatory to have an *expert opinion* on the possibility of publication.

7. The title of the article should clearly reflect its content, be informative and should not include unintelligible slang known only to Russian-speaking experts. While translating the article into English, please avoid any transliterations from Russian, except for proper names and other objects.

8. The author's abstract is intended to serve as a source of information independent of the article. The abstract is a precise statement of the content of the article, including the main factual information and conclusions, without additional interpretation or critical remarks of the author. The abstract should not contain information that is not included in the article. Schemes, tables, graphs and figures are not allowed in the abstract. The information contained in the title of the article should not be repeated in the text of the abstract. Standardized terminology should be used; abbreviations are not allowed. The abstract should be informative and reflect the main content of the article and research results. It is advisable to include the following aspects in the abstract:

– subject and purpose of the work;

– method or methodology of the work;

– main results of the work;

– field of application of the results;

– conclusion.

9. Keywords or phrases are text labels that represent the content of an article and can be used to find the article in a database. Therefore, when selecting keywords or phrases, you should list the main terms used in the article.

The manuscripts received are peer reviewed. The decision to publish is made by the editorial board of the journal on the basis of positive review; relevance of the topic.

10. A manuscript with a negative review is rejected and not returned. The article that needs improvement is sent to the author together with the reviewer's comments. The author should take into account all the remarks and make changes, after which the article is returned to the editorial board, where it is repeatedly reviewed. In case of disagreement with the reviewer the author should briefly and clearly justify his position. The editorial board reserves the right to reject articles that do not correspond to the journal's profile.

11. The Editorial Board informs the authors about the reasons that did not allow making a decision on the publication of the submitted manuscripts.

12. The authors of the articles are responsible for the accuracy of the facts, statistics, names and other information.

13. By submitting a manuscript to the editorial board, the author(s) undertakes not to publish it, either in whole or in part, in any other media without the consent of the editorial board.

14. Published articles and information about the authors in Russian and English are placed in free access on the Internet on eLIBRARY.RU platform.

15. All articles are checked by the Anti-Plagiarism system for incorrect borrowings.

Materials should be sent to: 680021, Khabarovsk, Seryshev st., 47, Far Eastern State Transport University (FESTU), Editorial Board of «Pacific Rim countries transportation system» journal. E-mail: apr-journal-ed@list.ru